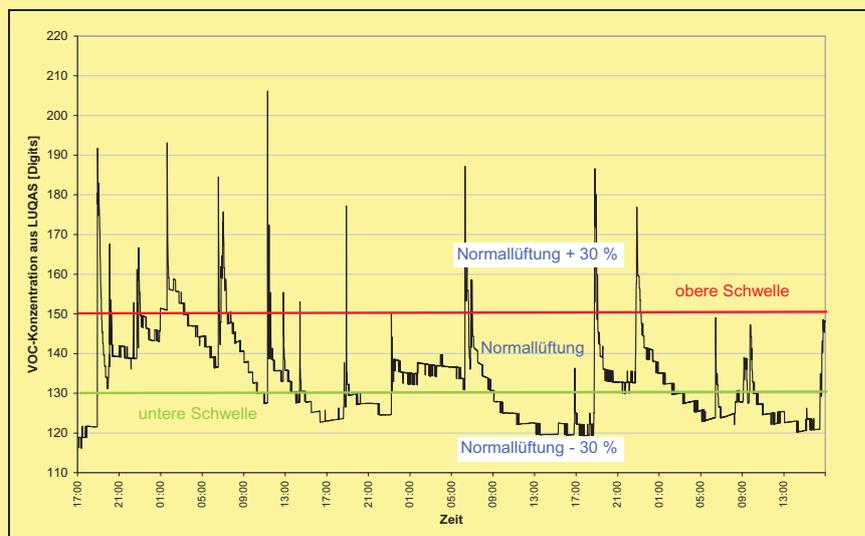


Forschungsprojekt

**Entwicklung energieeffizienter Komfortlüftungsanlagen mit luftqualitätsge-  
führter Volumenstromregelung und kontinuierlicher Erfassung des  
Fensteröffnungszustandes**



Teilbericht 1:

**Einsatz des LuQaS-Triple-Sensors zur luftqualitätsgeführten Volumen-  
stromregelung von mechanischen Lüftungsanlagen in Wohngebäuden**

Gefördert durch

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
(über Projektträger Jülich; Förderkennzeichen: 0327398A)

Institut Wohnen und Umwelt GmbH  
Rheinstraße 65; 64295 Darmstadt

Mai 2011

## **Autoren**

Marc Großklos

Dr. Witta Ebel (zu ihrer Zeit als IWU-Mitarbeiterin)

Dr. Jens Knissel

Reprotechnik: Reda Hatteh

ISBN 978-3-941140-18-9

IWU-Bestellnummer: 02/11

Institut Wohnen und Umwelt

Rheinstraße 65

64295 Darmstadt

[www.iwu.de](http://www.iwu.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>1</b>
<b>1 STAND DER FORSCHUNG</b>	<b>3</b>
1.1 Luftverunreinigungen (Art und Quellen)	3
1.2 Bewertung von Luftqualität	7
1.2.1 Bewertungsprinzipien	7
1.2.2 Olfaktometrie	8
1.2.3 Luftqualitätsbewertung nach Fanger: Olf und dezipol	13
1.3 Normen und Richtlinien	15
1.4 Messung von Luftqualität	18
1.4.1 Mögliche Messgrößen	18
1.4.2 Messung mit oxidierbaren Halbleiter-Sensoren	18
1.4.3 Messung mit dem „LuQaS“-Sensor	20
1.5 Regelungsansätze	35
1.5.1 Grundsätze	35
1.5.2 Lüftungsregelungen mit dem LuQaS-Sensor	37
1.6 Einordnung des aktuellen Projekts im Umfeld der bisherigen Arbeiten	41
<b>2 VORUNTERSUCHUNGEN MIT DEM LUQAS-SENSOR</b>	<b>43</b>
2.1 Messungen in einem Reihenendhaus in Passivhaus-Standard	43
2.1.1 Objektbeschreibung	43
2.1.2 Verlauf der VOC-Konzentrationen	44
2.1.3 Häufigkeitsverteilung der Messwerte	47
2.1.4 Glättung der Messwerte	49
2.1.5 Ermittlung von Quellstärken der Stofflast	50
2.2 Messungen in einer Passivhaus-Wohneinheit	54
2.3 Weitere Messungen zur Charakterisierung der LuQaS-Sensoren	59
<b>3 ENTWICKLUNG EINES REGELUNGSKONZEPTES</b>	<b>67</b>
3.1 Ansätze zur luftqualitätsgeführten Regelung	67
3.1.1 Betrachtung unterschiedlicher Reglertypen	67
3.1.2 Betriebsweisen der Lüftungsregelungen	69

3.1.3	Ansätze zur Ermittlung von Sollwerten	71
3.1.4	Spezielle Aspekte der Regelung	73
3.1.5	Nutzerrückmeldung und -einflussmöglichkeiten	76
3.1.6	Einsatzgrenzen der Luftqualitätsregelung	76
<b>3.2</b>	<b>Platzierung der Sensoren</b>	<b>78</b>
<b>3.3</b>	<b>Rechnerische Simulation</b>	<b>82</b>
3.3.1	Modellbildung	82
3.3.2	Ergebnisse bei der Schwellwertregelung	85
3.3.3	Fazit Luftqualitätsregelung	91
<b>4</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>93</b>

---

## Zusammenfassung

In diesem Berichtteil werden die vorbereitenden Arbeiten zum Forschungsprojekt „Entwicklung energieeffizienter Komfortlüftungsanlagen mit luftqualitätsgeführter Volumenstromregelung und kontinuierlicher Erfassung des Fensteröffnungszustandes“ dokumentiert.

Im ersten Kapitel wird der Stand der Luftqualitätsbewertung in Innenräumen im Kontext des aktuellen Projekts zusammengefasst und die bisher veröffentlichten Arbeiten mit dem Luftqualitätssensor LuQaS mit Blick auf die Projektziele ausgewertet.

Im zweiten Kapitel sind die vorbereitenden Messungen mit dem LuQaS-Sensor in zwei Passivhaus-Wohneinheiten sowie mehrere Einzelmessungen zur Charakterisierung des Sensors dokumentiert. Es zeigt sich, dass auch in Wohnungen mit mechanischer Lüftung sich die Nutzeraktivität in den Messwerten des Sensors erkennen lässt und die Messwerte auch in der Gebäudeabluft nennenswerte Signaländerungen erkennen lassen, so dass eine Regelung über zentrale Sensoren in Zu- und Abluft möglich erscheint.

Im dritten Kapitel sind die Überlegungen zur geeigneten Regelstrategie der Luftqualitätsregelung wiedergegeben. Neben der systematischen Diskussion unterschiedlicher Reglerarten, unterschiedlicher Betriebsarten, verschiedener Verfahren zur Ermittlung der Sollwerte und der Darstellung zusätzlicher Regelfunktionen wurden die Auswirkungen einer Schwellwertregelung mit verschiedenen Schaltschwellen und Volumenstromveränderungen auf die Luftqualität eines Modellgebäudes simuliert. Die Ergebnisse bestätigen die Erwartung, dass durch eine geeignete Luftqualitätsregelung die Luftqualität eines Gebäudes positiv beeinflusst werden kann.

Ergänzend sei an dieser Stelle auf einen weiteren Teilbericht dieses Projekts verwiesen, in dem die theoretischen Untersuchungen zur DrD-Methode dargestellt sind.



# 1 Stand der Forschung

## 1.1 Luftverunreinigungen (Art und Quellen)

Menschen halten sich heute durchschnittlich zu über 80 % in Innenräumen auf, den größten Teil davon in Wohnungen. Aus diesem Grunde muss der Qualität der Innenraumluft, insbesondere auch in Wohnungen, besondere Beachtung zukommen.

Wichtigste Quelle hoher temporärer Luftbelastungen in Innenräumen ist der Mensch selbst. Dies erkannte bereits im 19. Jahrhundert Max von Pettenkofer<sup>1</sup>. Als wesentliche Leitgröße eignet sich bis heute der Kohlendioxid-Gehalt (CO<sub>2</sub>) der Luft, obwohl von CO<sub>2</sub> in den dabei üblicherweise auftretenden Konzentrationen selbst keine gesundheitliche Beeinträchtigung ausgeht ebenso wenig wie ein wahrnehmbarer Geruch. Aber CO<sub>2</sub> ist ein sehr guter Maßstab für die gleichzeitig von Personen ausgehenden Emissionen, zumindest unter vergleichbaren Randbedingungen (wie Aktivitätsgrad, Reinigungsgewohnheiten der Personen) sowie im statistischen Mittel.

Davon ausgehend, dass Personen die Hauptverursacher von Verunreinigungslasten sind, legte Max von Pettenkofer (1858) einen CO<sub>2</sub>-Grenzwert von 0,1 % (bezogen auf das Luftvolumen) für eine gute Raumluftqualität fest. Dieser Maßstab hat bis heute Gültigkeit, wenngleich unterschiedliche Anforderungen je nach Ansprüchen an die jeweiligen Räume gestellt werden. CO<sub>2</sub> dient als universelle Messgröße für alle von Menschen dominierten Belastungssituationen, insbesondere in Wohn- und Büroräumen. Um den Pettenkofer-Grenzwert einzuhalten, ist eine Frischzufuhr von 30 m<sup>3</sup> pro Person und Stunde erforderlich. Diese Frischluftzufuhr reicht aus, um vom (sitzenden oder leicht arbeitenden) Menschen aufgrund seines Stoffwechsels emittierte Feuchtigkeit und organische Luftverunreinigungen (VOC), insbesondere Geruchsstoffe, in ausreichendem Maße abzuführen (s. folgender Abschnitt).

Bei erhöhtem Aktivitätsgrad steigen sowohl der CO<sub>2</sub>-Pegel als auch die sonstigen Emissionen des Menschen an, so dass CO<sub>2</sub> auch in diesem Fall als Indikator verwendet werden kann. Durch zahlreiche Untersuchungen wurde dieser Zusammenhang bestätigt. Demnach besteht eine hohe Korrelation zwischen der „Anzahl Unzufriedener“ (vgl. folgender Abschnitt) und der CO<sub>2</sub>-Konzentration, wenn die Ursache im Wesentlichen der Mensch ist. Im CEN-Bericht CR 1752 wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Differenz der Kohlendioxidkonzentration innen und außen sowie dem Anteil der Unzufriedenen in Räumen mit sitzenden Personen angegeben. Bei der Pettenkofergrenze (1000 ppm) bzw. einer Konzentrationsdifferenz von 650 ppm beträgt der Anteil der Unzufriedenen 20 %.

---

<sup>1</sup> M. Pettenkofer, 1858

Nicht erfasst wird bei einer CO<sub>2</sub>-Messung aber z. B. die Belastung, die von Rauchern ausgeht. Raucher emittieren ein Vielfaches an Geruchs- und Schadstoffen (über 4000 Verbindungen wurden im Tabakrauch nachgewiesen, von denen viele karzinogen sind), außerdem steigt der Kohlenmonoxid-Gehalt.

Neben dem Menschen gibt es zudem weitere Emittenten von Problem- und Geruchsstoffen bzw. dem ebenfalls für Behaglichkeit und Gesundheit wichtigen Staub. Verursacher sind insbesondere Bauprodukte, Einrichtungsgegenstände, Bürogeräte, Reinigungsmittel, Hygiene-Produkte, Tiere, Mikroorganismen (Pilze, Milben, Bakterien) sowie die spezifische Nutzung des Gebäudes (siehe Tabelle 1-1).

Auch die Außenluft enthält Verunreinigungen in erheblichem Umfang. Neben den natürlichen Quellen (z.B.: Pollen, Bodestaub) stammen anthropogene Verschmutzungen aus Industrie, Hausbrand und Verkehr.

Die vielfältigen Luftverunreinigungen haben ebenfalls eine hohe Bedeutung für die Raumluftqualität. Kohlendioxid eignet sich dann nicht mehr als Leitgröße für die Gesamtbelastung der Luft. In jedem Fall ist eine genauere Kenntnis der Luftbelastung oft erforderlich oder wünschenswert. Mit aufwändigen Methoden kann eine Vielzahl relevanter Luftverunreinigungen messtechnisch erfasst werden. Meistens allerdings können nur Momentaufnahmen zu einzelnen Zeitpunkten gemacht werden, oder Belastungen können nur kumulativ erfasst werden (Passivsammler), und die Auswertung kann einige Zeit erfordern. Diese Methoden sind vor allem dann gut geeignet, wenn tatsächlichen Problemquellen ursächlich nachgegangen werden soll.

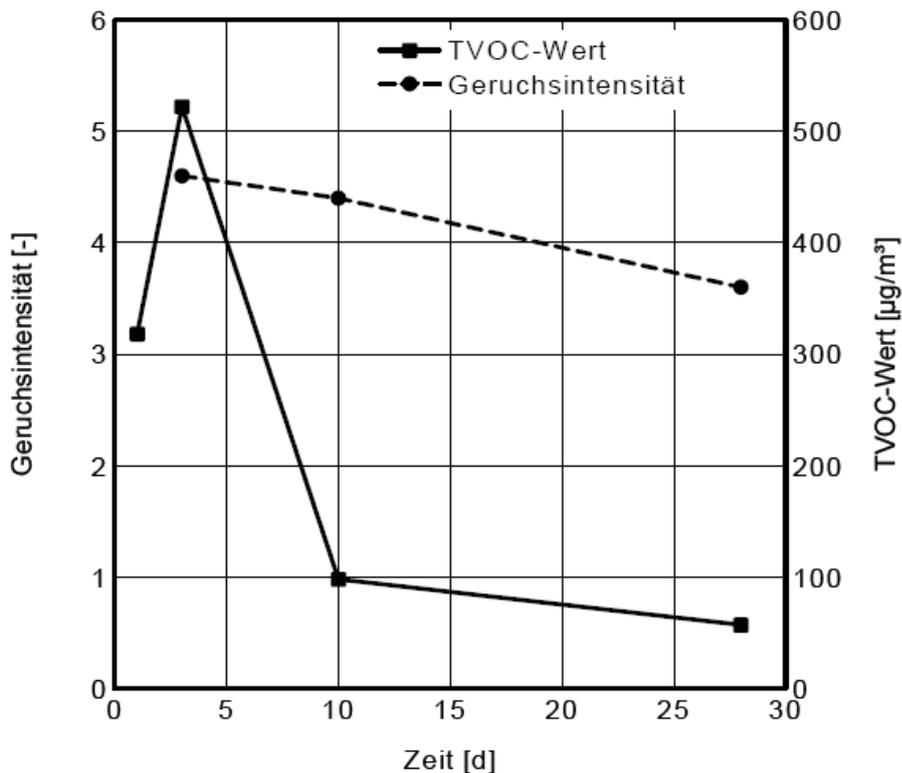
**Tabelle 1-1: Quellen der Luftverunreinigung in Innenräumen<sup>2</sup>**

Quellen	Stoffe
Bauprodukte	Asbeststaub, Staub von künstlichen Mineralfasern, Holzstaub, Formaldehyd, Pentachlorphenol (PCP), polychlorierte Biphenyle (PCB) z.B. aus Fugendichtmassen
Ausstattungsmaterialien und Einrichtungsgegenstände	Weichmacher, Schädlingsbekämpfungsmittel, Lösungsmittel, Formaldehyd, PCB
Offene Flammen, Feuerstellen und Außenwandfeuerstätten	Stickstoffdioxid, weitere Stickstoffoxyde, Kohlenmonoxid, organische Verbindungen, Ruß und Asche.
Raumluftechnische Anlagen	Schimmelpilze, Algen, Protozoen, Bakterien und andere Mikroorganismen
Baugrund	Radon
Umgebungseinflüsse, Straßenverkehr und gewerbliche Emissionen	Kohlenwasserstoffe aus Boden-Altlasten; CO, Kohlenwasserstoffe, NO <sub>x</sub> durch Straßenverkehr; Lösungsmittel aus gewerblichen Betrieben (z.B. Reinigungen)
Putz-, Reinigungs- und Pflegemittel	Konservierungsmittel, Lösemittel, organische Säuren und Treibgase aus Ledersprays, Haarsprays, Nagellack und Deodorantien, Duftkerzen, Raumlufsprays etc.
Mittel zur Ungezieferbekämpfung und Desinfektion, zum Holz- und Textilschutz sowie zum Schutz von Zimmerpflanzen	ausgasende Wirkstoffe und Lösemittel
Gebrauchsartikel und Produkte des Heimwerker-, Hobby- und Bastelbereichs	z.B. Lösungsmittel aus Farben, Lacken und Klebstoffen
Tabakrauch	CO, Nikotin, Stickstoffoxide, Formaldehyd, Staub
Mikroorganismen, Haustiere	Staub aus Tierhaaren von Haustieren, allergisierende Stoffe
Unsachgemäße Verwendung chemischer Stoffe und Produkte in Innenräumen	Diverse

Die Messergebnisse aus derartigen Untersuchungen können Grundlage für eine präzise Luftqualitätsbewertung sein, wobei ein Maßstab für die Bewertung und gegebenenfalls Gewichtung der einzelnen Luftbestandteile vorgegeben werden muss. Hierfür gibt es verschiedene Ansätze und Verfahren, jeder Qualitätsmaßstab enthält eine gewisse Willkür. Meistens wird als Messgröße „TVOC“ angegeben, dabei werden die gemessenen Einzelkonzentrationen für die verschiedenen flüchtigen organischen Substanzen innerhalb eines bestimmten Bereichs addiert, wobei sehr flüchtige und schwer flüchtige organische Substanzen („VVOC“ und „SVOC“) weitgehend unberücksichtigt bleiben. Sie kann aber allenfalls als Leitgröße für die VOC-Belastung dienen, da die gesundheitlichen und Geruchs-Belastungen sehr unterschiedlich sind und die Korrelation z. B. mit Geruch und TVOC oft schlecht ist. Für eine relevante Aussagekraft werden zusätzliche Informationen benötigt (s. z.B. ECA Report 19, 1997). Oft gibt es keinen direkten Zusammenhang zwischen geruchsaktiven Substanzen und der Gesamtemission an TVOC. Für die Bewertung von Raumlufqualität reicht daher der Summen-

<sup>2</sup> Hrsg.: Bundesministerium. Umweltpolitik. Konzeption der Bundesregierung zur Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen, Bonn, 1992

parameter nicht aus. Abbildung 1.1-1 zeigt am Beispiel eines Parkettbodens eine langandauernde Geruchsbelastung, obwohl der Wert „Total volatile organic compounds“ schnelle absinkt.



**Abbildung 1.1-1: Vergleich der Gesamtemission (TVOC) mit der human-olfaktorisch bestimmten Geruchsintensität im 28-Tage-Prüfkammerversuch eines Parkettbodens [Mayer&Breuer, 2000]**

Ähnliche Beobachtungen wurden mit dem Vergleich von wahrnehmbarem Geruch und Messwerten des LuQaS-Sensors gemacht (vgl. Kapitel 2.2).

Vor allem unter dem Aspekt der Gesundheitsrisiken befasst sich der Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten (AGBB) mit der Entwicklung von Bewertungsschemata für Emissionen aus nicht personenbezogenen Quellen in Innenräumen. Grundlage sind die Berichte der „European Collaborative Action (ECA) „Indoor Air Quality and its impact on man“ [ECA 1997ff]. Die Bestimmung der Emissionen von VOC aus Bauprodukten erfolgt in einer Emissionsprüfkammer gemäß der europäischen Norm EN 13419. Zur Beurteilung werden Einzelstoffe und TVOC erfasst, außerdem SVOC und karzinogene, mutagene und reproduktionstoxische Stoffe.

Liegt ein belastbarer Qualitäts- und Bewertungsmaßstab vor, so kann im nächsten Schritt versucht werden, nur noch eine (oder wenige) Größen zu messen, die diesem Bewertungsmaßstab möglichst nahe kommen.

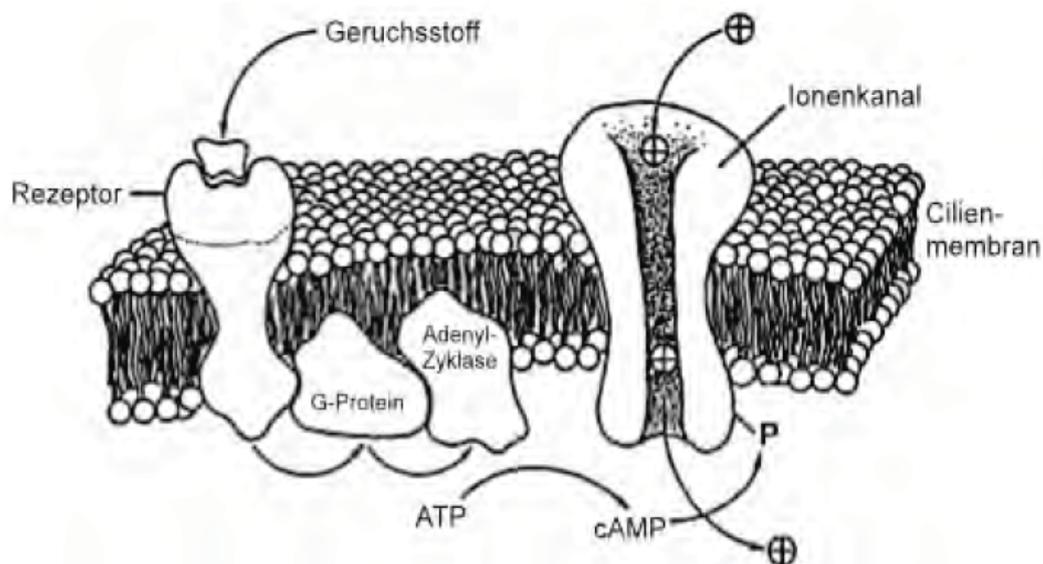
## 1.2 Bewertung von Luftqualität

Die wichtigsten Bewertungskriterien sind Gesundheitsrisiken und die Geruchsbelastung als wesentliche Komfortparameter. Während eine gesundheitliche Bewertung sehr stark an spezifische Belastungen aus ebenso spezifischen Quellen gekoppelt ist, hat der Mensch mit Geruchs- und Behaglichkeitsempfinden als Gesamtqualität bereits ein biologisches Sensorsystem entwickelt, das zur Grundlage einer Bewertung gemacht werden kann.

### 1.2.1 Bewertungsprinzipien

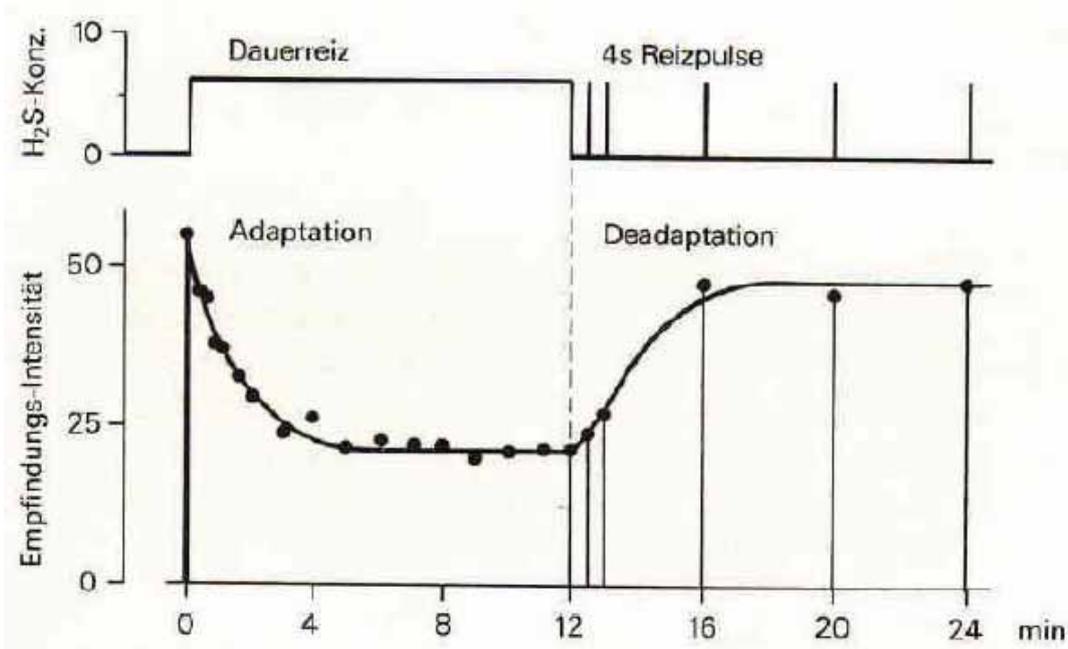
#### 1.2.1.1 Gerüche

Die Wahrnehmung von Gerüchen entsteht durch chemische Reaktionen von Geruchsstoffen an der Riechschleimhaut in der Nase des Menschen. Viele der Geruchsstoffe sind VOC („Volatile Organic Compounds“) (Abbildung 1.2-1).



**Abbildung 1.2-1: biochemische Vorgänge an der Riechmembran [VDI 3881]**

Die Wahrnehmung von Gerüchen dient neben der Gefahrenanzeige (Hinweis auf gefährliche Bestandteile der Atemluft, aber auch gefährliche Ereignisse (z. B. Feuer) weiteren Funktionen: Sie bilden einen Bestandteil der Geschmackswahrnehmung, sind Bestandteil der sozialen Kommunikation (Pheromone), und sie dienen zur Differenzierung im Sozialsystem. Adaptationsprozesse führen zu einer nur begrenzten Reproduzierbarkeit der Wahrnehmungsqualitäten (vgl. Abbildung 1.2-2). Entsprechend komplex sind die psychophysiologischen Grundlagen der Geruchswahrnehmung und die Bewertungsprinzipien und Messverfahren für Gerüche.



**Abbildung 1.2-2: Adaptation der Geruchswahrnehmung bei Schwefelwasserstoff [Venecek, 2004]**

## 1.2.2 Olfaktometrie

Bei den Untersuchungs- und Bewertungsmethoden sind grundsätzlich technische und personengebundene Messverfahren zu unterscheiden. Im Falle gesundheitlich relevanter Belastungen kommen chemische Analysen zum Einsatz. Ein wesentlicher Parameter für menschliches Wohlbefinden sind aber Gerüche bzw. Geruchsbelastungen. Die menschliche Nase ist ein empfindliches Messgerät für Luftbelastungen. Aus diesem Grund werden oft personengebundene Verfahren eingesetzt. Technische Verfahren wie elektronische Nasen oder Sensoren zur Messung der Gesamtluftbelastung müssen sich in Bezug auf Gerüche mit personengebundenen Verfahren vergleichen lassen.

Die Olfaktometrie befasst sich mit der Bewertung von Geruchsbelastungen. Der Mensch kann bis zu 10000 verschiedene Gerüche wahrnehmen und ca. 4000 unterscheiden [Schmidt, Scheible, 2001], wobei die Zuverlässigkeit der Differenzierung allerdings gering ist [Sekuler & Blake, 2002].

**Tabelle 1-2: Klassifikation von Gerüchen: Geruchstypen (Primärgerüche nach Amoore (Primärgerüche nach [Amoore 1970], zitiert nach [Goldstein, 2002])**

Primärgeruch	Chemische Substanz	Trivialsubstanz
kampferartig	Kampfer	Mottenpulver
moschusartig	$\omega$ -Hydroxypentadecansäurelacton	Angelikawurzelöl
blumig	Phenylethyl-methyl-ethyl-carbinol	Rose
minzig	Menthon	Pfefferminzbonbon
ätherisch	Ethylen-dichlorid	Fleckenwasser
schweißig	Buttersäure	Schweiß
faulig	Buthylmercaptan	faule Eier

Die Reizempfindlichkeit auf Geruchssubstanzen ist dabei sehr unterschiedlich ausgeprägt, manche Gerüche können in extremer Verdünnung noch wahrgenommen werden. Die Reizschwelle hängt dabei von den Umgebungsparametern Temperatur und Feuchtigkeit ab (s. u.). Die Gerüche können einerseits verschiedenen „Geruchstypen“ zugeordnet werden (vgl. Tabelle 1-2), andererseits können sie in Bezug auf

- Wahrnehmbarkeit,
- Stärke (Intensität),
- Empfindungsqualität (angenehm/unangenehm) (Hedonik) und auf ihre
- Akzeptanz

beurteilt und bewertet werden.

Weber entdeckte Mitte des 19. Jahrhunderts, dass die Wahrnehmung einer Veränderung von dem absoluten Niveau eines Geruchsstoffs abhängt. Eine relative Erhöhung der Konzentration von 7 bis 12 % führt in der Regel zu einer Verstärkung der Wahrnehmung. Darauf aufbauend, postulierte Fechner 1860 eine logarithmische Abhängigkeit der Intensitätswahrnehmung von der Konzentration eines Geruchsstoffs, ähnlich etwa der Schallwahrnehmung

$$\text{Reizempfindungsstärke} = k * \log (R/R_0),$$

wobei R die Reizstärke (Geruchsstoffkonzentration), R<sub>0</sub> die Reizstärke an der Geruchsschwelle ist und k (Weber-Fechner-Koeffizient) und R<sub>0</sub> stoffabhängige Konstanten. Stevens (1957) postulierte dagegen eine Potenzfunktion für den Zusammenhang zwischen Reizstärke und Reizempfindung:

$$\text{Reizempfindungsstärke} = k * (R - R_0)^n$$

wobei n (stoffabhängig) Werte zwischen 0,2 und 0,7 annehmen kann; der Zusammenhang ist also auch hier deutlich sublinear.

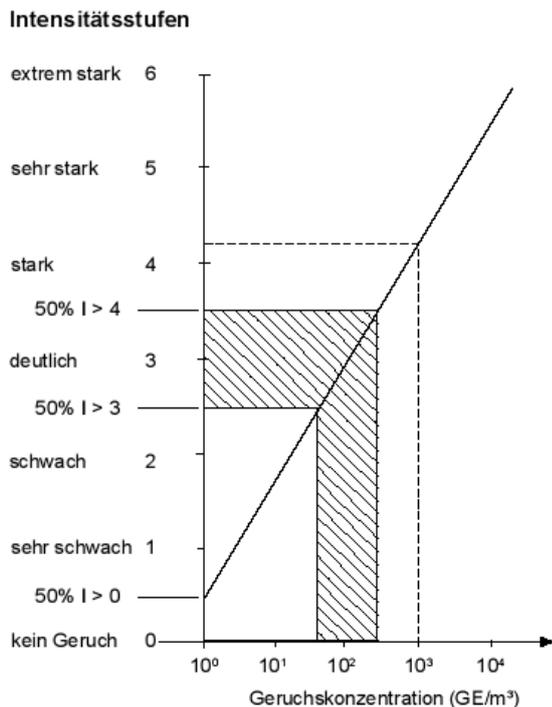
## Bewertung von Geruchsparametern

Grundsätzlich erfolgt die Messung dieser Bewertungsgrößen mit Probanden, wobei Verfahren mit untrainierten und trainierten Probanden unterschieden werden.

Die erste personengebundene (d. h. subjektive) Methode zur Bewertung von Luft stammt von Yaglou [Yaglou, 1936; 1937]. Dabei wurde die Intensität einer Luftprobe durch untrainierte, unadaptierte (d. h. bei Betreten des Raumes) Probanden auf einer sechsstufigen Skala von 0 bis 5 beurteilt. Die individuellen Werte wurden statistisch ausgewertet, um zu einer personennunabhängigen Bewertung der Luft zu kommen.

Die wichtigsten Messgrößen sind die Intensität, die Hedonik und die Akzeptanz. Keine dieser Größen lässt sich aus der anderen ableiten, aber natürlich sind diese Größen nicht voneinander unabhängig.

Heute wird die Geruchsintensität üblicherweise auf einer Skala von 0 bis 6 bewertet (vgl. VDI-Richtlinie 3882) (siehe Abbildung 1.2-3).



**Abbildung 1.2-3: Intensitätsstufen [VDI 3881]**

Die Bewertung wird zunächst von Probanden durchgeführt. Die Intensitätsbewertung für den Geruch ergibt sich dann als Median der von den Probanden genannten Intensitäten.

Die wahrnehmbare Geruchsintensität hängt ebenso wie der Zusammenhang zwischen Konzentration und Bewertung stark vom Geruchsstoff ab.

Eine besondere Bedeutung kommt der so genannten Geruchsschwelle [nach DIN EN13725] zu: Dies ist die Konzentration eines Geruchsstoffes, bei der die Hälfte der Probanden den Geruch überhaupt wahrnimmt; damit kann noch kein spezifischer Geruch erkannt werden<sup>3</sup>. Geruchsschwellen liegen meistens mehrere Größenordnungen unter Konzentrationen bei denen beim Menschen Schleimhautreizungen auftreten können [Cain, 1996]. Auf der Intensitätsskala wird dieser Geruchsintensität definitionsgemäß der Wert 0,5 zugeordnet.

Aus der Geruchsschwelle leitet sich ferner der Begriff der „Geruchseinheit“ [DIN EN 13725] ab: die Geruchseinheit „GE“ ist die Menge an geruchserzeugender Substanz, die in einem m<sup>3</sup> Luft gleichmäßig verteilt eine Geruchsempfindung auslöst, so dass die Konzentration 1 GE/m<sup>3</sup> zu einer Intensitätsbewertung von 0,5 führt.

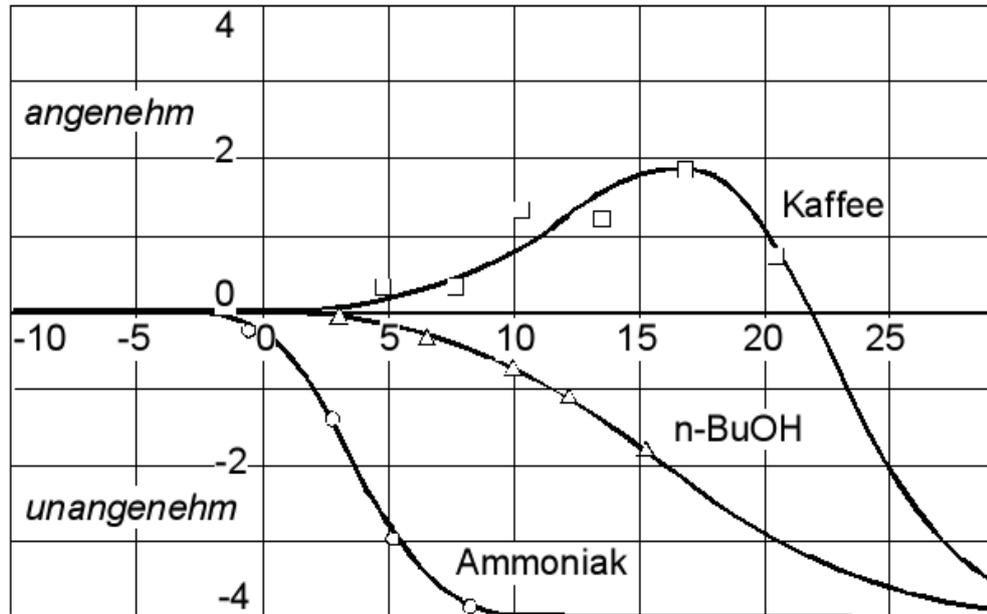
Aus Bewertungen mit einem trainierten Panel anhand eines Vergleichsmaßstabs leiten sich weitere Einheiten für die Intensität (Perceived Intensity, „pi“ [Müller et al., 2004]) ab, die in der wissenschaftlichen Literatur verwendet werden. Messergebnisse mit trainierten Probanden lassen sich z. Zt. nicht unmittelbar umrechnen in solche mit untrainierten. Die prinzipiellen Zusammenhänge werden aber mit beiden Verfahren ähnlich wiedergegeben.

Unter Hedonik versteht man die psychologische Bewertung eines Geruchs als angenehm oder unangenehm. Dabei werden üblicherweise symmetrische Skalen verwendet, die von -4 bis 4 (oder von -1 bis 1) reichen. Einem neutralen Eindruck („weder angenehm noch unangenehm“) wird dabei der Wert 0 zugeordnet; die Bewertung „äußerst angenehm“ bzw. „äußerst unangenehm“ erhalten die Wert +4 bzw. -4.

Die hedonische Bewertung kann von der Intensität eines Geruchs abhängen. Sie stellt aber eine eigene Empfindungsqualität dar. Die Bewertungen können individuell stark schwanken, und die individuelle Bewertung ist nicht konstant, sie ist u. a. abhängig vom Hormonspiegel und dem Sättigungspegel. Die hedonische Bewertung hängt nicht immer monoton von der Konzentration eines Geruchsstoffs ab. Substanzen, die eine angenehme Empfindung hervorrufen, können in großer Konzentration unangenehm sein (vgl. Abbildung 1.2-4).

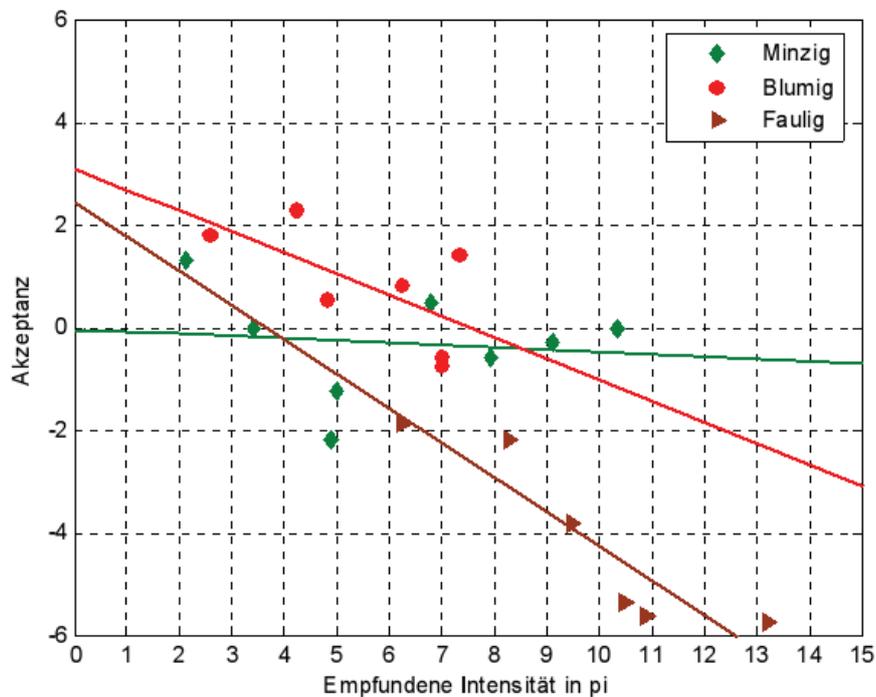
---

<sup>3</sup> zum Erkennen eines Geruches ist in der Regel die 50-fache Konzentration der Geruchsschwelle erforderlich



**Abbildung 1.2-4: Hedonische Bewertung in Abhängigkeit von der Stoffkonzentration für verschiedene Geruchsstoffe [Fitzner, HRI]**

Die Akzeptanz ist ein Maß für die Zufriedenheit. Sie wird auf einer diskreten Skala von -10 (klar nicht akzeptabel) bis +10 (klar akzeptabel) gemessen, oder auf einer kontinuierlichen Skala von -1 bis 1.



**Abbildung 1.2-5: Messergebnisse für empfundene Intensität und Akzeptanz für drei verschiedene Geruchsqualitäten [Panaskova & Müller, 2006]**

Die Akzeptanz hängt sowohl von der Art des Geruches als auch von dessen Intensität ab. Wie stark sich die Bewertung durch die Intensität verändert, kann ebenfalls sehr unterschiedlich sein. Abbildung 1.2-5 zeigt einen experimentell ermittelten Zusammenhang zwischen Akzeptanz und Intensität bei drei verschiedenen Geruchsqualitäten [Panaskova&Müller, 2006].

Die Geruchsstoffwahrnehmung, insbesondere ihre Akzeptanz ist nicht nur von der Geruchsstoffkonzentration und deren Zusammensetzung, sondern auch erheblich von Temperatur und Feuchte abhängig. Fang stellte fest, dass die entscheidende Einflussgröße dabei die spezifische Enthalpie der Luft ist [Fang, 1997].

Die Luftfeuchtigkeit erweist sich daher auch in diesem Zusammenhang noch einmal als wesentlicher Parameter für die Bewertung der Luftqualität. Daher sollte den Feuchtebelastungen, die vom Menschen und seiner Tätigkeit ausgehen, ebenfalls Beachtung geschenkt werden. Bei einer messtechnischen Erfassung der Luftqualität sollte die Feuchtigkeit, die mit keiner der anderen Qualitätsmessgrößen notwendig korreliert sein muss, gesondert erfasst werden.

Die Akzeptanzbewertung eines Geruchs, die sich aus der Bewertung durch Versuchspersonen ergibt, ist korreliert mit dem Anteil an (zufällig ausgewählten) Personen, die mit der Luftqualität unzufrieden sind. Die individuelle Bewertung ist hier dichotom (d. h. es gibt zwei Untermengen ohne Schnittmenge), der kontinuierliche Maßstab ergibt sich aus der Häufigkeitsverteilung dieser Bewertungen.

Der Anteil der Unzufriedenen ist bei gegebener Akzeptanz A (auf einer Skala von -1 bis +1):

$$PD = \frac{e^{-0,18-5,28 \cdot A}}{1 + e^{-0,18-5,28 \cdot A}}$$

PD ist eine Zahl zwischen 0 und 1 und wird üblicherweise in % angegeben („Percentage Dissatisfied“ bzw. „PPD“).

### 1.2.3 Luftqualitätsbewertung nach Fanger: Olf und dezipol

Der international am weitesten verbreitete Bewertungsstandard (s. ASHRAE, CEN prENV 1752) wurde von Ole Fanger an der Technischen Universität Lyngby entwickelt [Fanger 1988]. Er umfasst verschiedene Größen:

#### Geruchsquellen

Das Olf, abgeleitet vom lateinischen Wort für Geruchssinn = Olfactus, ist eine Maßeinheit zur Bewertung der Stärke einer Geruchsquelle. Grundlage des Maßstabs sind die Emissionen einer durchschnittlichen, einzelnen Person an Geruchsstoffen, sogenannte Bioeffluente.

Ein Olf ist die Geruchsabgabe (bezogen auf die Zeiteinheit, also eine „Geruchsleistung“) eines „Normmenschen“ (erwachsene Person mit einem Hygienestandard von 0,7 Bädern pro Tag, 1,8 m<sup>2</sup> Hautoberfläche, nicht rauchend und bei sitzender Tätigkeit).

### Geruchsstärken

Die Geruchsabgabe führt zu einer Geruchsbelastung des Raumes, in der sich der Mensch aufhält. Bei einer konstanten Lüftungsrate stellt sich ein stationärer Zustand ein. Die Gleichgewichtsgeruchsstärke bei einer Geruchsabgabe von 1 Olf bei einer Belüftung mit 1 Liter/sec wird mit „1 Pol“ bezeichnet. Fanger geht davon aus, dass sich diese Geruchsstärke als „Empfundene Luftqualität“ messen lässt. Da eine empfundene Luftqualität von 1 Pol bereits relativ schlecht ist, misst er die Luftqualität in decipol (1 decipol = 10<sup>-1</sup> Pol). Eine Geruchsabgabe eines Normmenschen (1 Olf) führt also bei einem Luftwechsel von 10 l/s = 36 m<sup>3</sup>/h zu einer empfundenen Luftqualität von 1 decipol. Abbildung 1.2-6 zeigt einige typische Geruchsquellen nach Fanger.

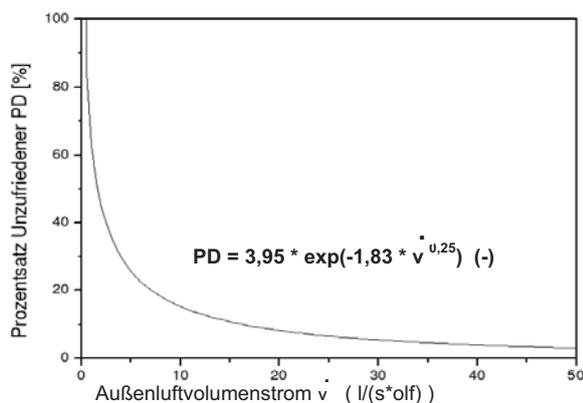
(Fanger, 1988)

### Olf values for humans

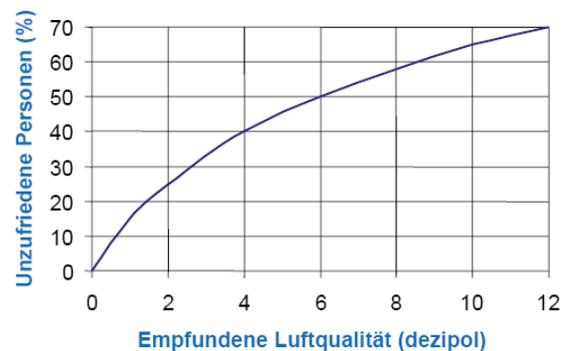
Sedentary person (1 met)	1 olf
Active person (4 met)	5 olf
Active person (6 met)	11 olf
Smoker (not smoking)	6 olf
Smoker smoking	25 olf

**Abbildung 1.2-6: Typische Geruchsquellen bei Personen nach Fanger**

In umfangreichen Messreihen hat Fanger den Zusammenhang zwischen der von ihm definierten empfundenen Luftqualität C (in decipol), bzw. von dem Außenluftvolumenstrom bei einer gegebenen Belastung durch eine Geruchsquelle und der Anzahl der Unzufriedenen (Percentage dissatisfied, PD in %) statistisch ermittelt (vgl. Abbildung 1.2-7).



**Abbildung 1.2-7: Anteil Unzufriedener in Abhängigkeit vom personenbezogenen Außenluftvolumenstrom, nach Fanger**



**Abbildung 1.2-8: Zusammenhang Empfundene Luftqualität zu unzufriedene Personen**

Aus einer entsprechenden Regressionsanalyse wurde die folgende Formel angegeben:

$$\text{Luftqualität} \quad C = \frac{112}{(\ln(\text{PD}) - 5,98)^4} \quad [\text{decipol}]$$

Über diesen Anteil Unzufriedener lässt sich die Akzeptanz (gem. vorigem Abschnitt) in die Luftqualitätsbewertung nach Fanger umrechnen. Aus dem Zusammenhang zwischen Akzeptanz bzw. Luftqualitätsmaßstab einerseits und dem zu erwartenden Anteil Unzufriedener (PPD) leiten sich die Bewertungskategorien für Luftqualität ab (vgl. Tabelle 1-3).

**Tabelle 1-3: Olfaktorische Messergebnisse und Bewertungskategorien (DIN V EN 13419 – 1(1999)). Zitiert nach [Breuer & Mayer, 2001]**

Standard-bewertungs-kategorie [-]	Geruchsintensität		Hedonische Geruchswirkung		Empfundene Luftqualität	
	Messwert-bereich <sub>K<sub>ger</sub></sub> [-]	verbal	Messwert-bereich [-]	verbal	Messwertbereich Akzeptanz [-]	Empfundene Luftqualität [decipol]
1	0 bis 1	Nicht wahr-nelmbär bis sehr schwach	4 bis 0	Äußerst angenehm bis weder angenehm noch unangenehm	> 0	0 bis 5
2	> 1 bis 2	Sehr schwach bis schwach	< 0 bis -0,8	Weder angenehm noch unangenehm     Äußerst unangenehm	0 bis -0,14	> 5 bis 10
3	> 2 bis 3	Schwach bis deutlich	<-0,8 bis -1,6		< -0,14 bis -0,25	> 10 bis 15
4	> 3 bis 4	Deutlich bis stark	<-1,6 bis -2,4		< -0,25 bis -0,36	> 15 bis 20
5	> 4 bis 5	Stark bis sehr stark	<-2,4 bis -3,2		< -0,36 bis -0,5	> 20 bis 25
6	> 5 bis 6	Sehr stark bis extrem stark	<-3,2 bis -4,0		< -0,5	> 25

### 1.3 Normen und Richtlinien

Anforderungen an den Luftwechsel mit dem Ziel der Erreichung einer ausreichenden Luftqualität werden in der DIN 1946-6 für Wohngebäude und in DIN EN 13779 (ersetzt DIN 1946-2) für Nichtwohngebäude gestellt. In DIN EN 13779 werden vier Luftqualitätskategorien definiert, IDA 1 bis IDA4, die die zulässige CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum als Überschreitung der Außenluftkonzentration festlegt (siehe Tabelle 1-4).

**Tabelle 1-4: Luftqualitätsklassen und zulässiger CO<sub>2</sub>-Gehalt nach [DIN EN 13779]**

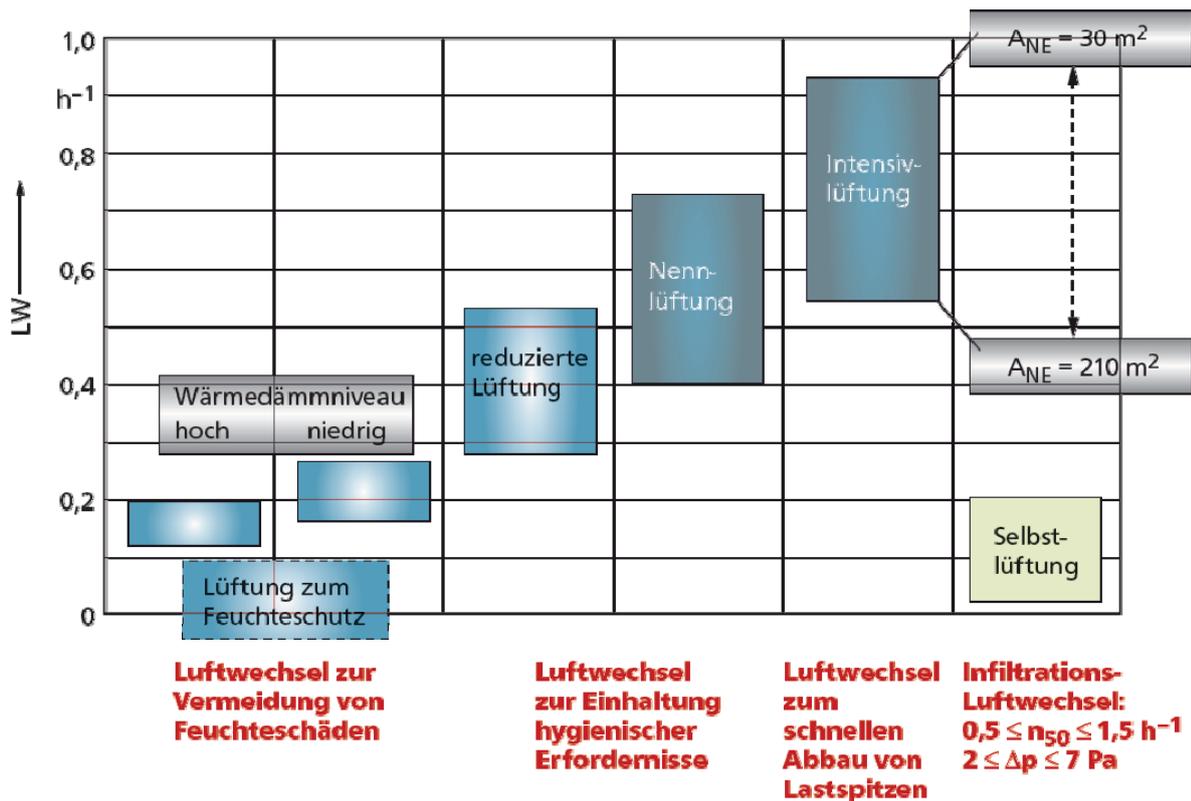
Kategorie	CO <sub>2</sub> -Gehalt über dem Gehalt in der Außenluft, in ppm	
	Üblicher Bereich	Standardwert
IDA 1	< 400	350
IDA 2	400 – 600	500
IDA 3	600 – 1 000	800
IDA 4	> 1 000	1 200

Aus den Angaben in Tabelle 1-4 ergeben sich zugehörige Außenluftvolumenströme, die zur Erreichung der Luftqualitätskategorien erforderlich sind (Tabelle 1-5).

**Tabelle 1-5: Außenluftvolumenströme nach [DIN EN 13779]**

Kategorie	Einheit	Außenluftvolumenstrom je Person			
		Nichtraucherbereich		Raucherbereich	
		Üblicher Bereich	Standardwert	Üblicher Bereich	Standardwert
IDA 1	$l \cdot s^{-1} \cdot Person^{-1}$	> 15	20	> 30	40
IDA 2	$l \cdot s^{-1} \cdot Person^{-1}$	10 – 15	12,5	20 – 30	25
IDA 3	$l \cdot s^{-1} \cdot Person^{-1}$	6 – 10	8	12 – 20	16
IDA 4	$l \cdot s^{-1} \cdot Person^{-1}$	< 6	5	< 12	10

Die DIN 1946- 6 regelt die Lüftung für Wohngebäude. Unterschieden wird dabei in Lüftung zum Feuchteschutz, reduzierte Lüftung zur Einhaltung hygienischer Erfordernisse, Nennlüftung sowie Intensivlüftung. Die Luftwechsel werden in Abhängigkeit von der Nutzfläche sowie teilweise vom energetischen Standard bestimmt (Abbildung 1.3-1).



**Abbildung 1.3-1: Exemplarische Darstellung der Außen-Luftvolumenströme für Wohngebäude mit  $A_N$  20 bis 210  $m^2$  nach DIN 1946-6 [nach Heinz, 2009]**

Die anzusetzenden Luftvolumenströme je Person werden je nach Lüftungskonzept (freie Lüftung, ventilatorgestützte Lüftung) unterschiedlich berechnet. Als Orientierungsgröße können die Daten aus [Heinz, 2007] verwendet werden, die sich jedoch noch auf eine ältere Fassung der DIN 1946-6 bezieht (Tabelle 1-6).

**Tabelle 1-6: Planmäßige Abluft- und Zuluftvolumenströme nach DIN 1946-6 (alt) (zitiert nach [Heinz, 2007])**

Planmäßige Abluftvolumenströme		Planmäßige Zuluftvolumenströme	
Küche	40 bis 60m <sup>3</sup> /h	Schlafen	17 bis 20m <sup>3</sup> /h
Bad	40 bis 60m <sup>3</sup> /h	Wohnen	20 bis 25m <sup>3</sup> /h
WC	20 bis 30m <sup>3</sup> /h	Arbeitsraum	25 bis 30m <sup>3</sup> /h

Grundlagen der Olfaktorischen Bewertung sind die VDI-Richtlinien VDI 3881 bis 3883.

<a href="#">VDI 3881 Blatt 1</a>	Olfaktometrie - Geruchsschwellenbestimmung - Grundlagen
<a href="#">VDI 3881 Blatt 2</a>	Olfaktometrie - Geruchsschwellenbestimmung - Probenahme
<a href="#">VDI 3881 Blatt 3</a>	Olfaktometrie - Geruchsschwellenbestimmung - Olfaktometer mit Verdünnung nach dem Gasstrahlprinzip
<a href="#">VDI 3881 Blatt 4</a>	Olfaktometrie - Geruchsschwellenbestimmung - Anwendungsvorschriften und Verfahrenskenngrößen
<a href="#">VDI 3882 Blatt 1</a>	Olfaktometrie; Bestimmung der Geruchsintensität
<a href="#">VDI 3882 Blatt 2</a>	Olfaktometrie - Bestimmung der hedonischen Geruchswirkung
<a href="#">VDI 3883 Blatt 1</a>	Wirkung und Bewertung von Gerüchen - Psychometrische Erfassung der Geruchsbelastigung - Fragebogentechnik

Die VDI 3881 wurde 2005 ersetzt durch die Norm DIN EN 13725 „Luftbeschaffenheit; Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie“ (Ausgabe 2003-07). Die Norm befasst sich mit der Wahrnehmbarkeit, der Intensität, der Qualität und der hedonischen Wirkung von Gerüchen und definiert ein personenbasiertes Verfahren zur Bestimmung der Geruchsintensität mit Hilfe dynamischer Olfaktometrie.

In der Internationalen Normung geben der ASHRAE Standard 62 sowie der CEN-Bericht CR 1752 (Deutsche Fassung; DIN-Fachbericht 79) Anhaltspunkte für die Auslegung von Lüftungsanlagen. Dabei wird nach Anforderungen an Behaglichkeit und Gesundheit unterschieden. In dem Bericht werden Werte für sensorische Verunreinigungslasten durch Möbel, Teppiche und Klimaanlage angegeben und die erforderlichen Luftvolumenströme abgeleitet (Tabelle 1-7).

**Tabelle 1-7: Luftvolumenströme in Abhängigkeit vom Raucheranteil in CR 1752**

Category	Required ventilation rate (l/s per occupant)			
	No Smoking	20%	40%	100%
A	10	20	30	30
B	7	14	21	21
C	4	8	12	12

## 1.4 Messung von Luftqualität

### 1.4.1 Mögliche Messgrößen

Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) als Leitgröße: kommt vor allem dann in Betracht, wenn die Belastungen im Wesentlichen von anwesenden Menschen ausgehen, z. B. Versammlungsräume, Schulen, Vorlesungssäle, aber auch Schlafzimmer.

VOC (Einzelmessungen): Die Analyse einzelner Stoffe ist mit gaschromatischen Verfahren möglich, die aber aufwändig sind. Der Vorteil aber liegt vor allem darin, dass die Einzelstoffe identifiziert werden können und gezielt den Ursachen nachgegangen werden kann.

TVOC (Total volatile organic compounds): Berechnung eines Summenwertes aus den Einzelmessungen. VVOC und SVOC werden dabei nicht berücksichtigt.

TOC (Total Organic compounds): Messungen mit einem Photoakustischen Monitor. Die erfasste Bandbreite ist größer als bei den TVOC. Die einzelnen Substanzen werden ungleich gewichtet. Diese Messungen wurden im Rahmen des Forschungsprojekts LUQAS II als Vergleichswerte für die Messungen mit der Lüftungsampel mit herangezogen [UTEK et al. 2004]

Mischgassensoren: Diese erfassen oxidierbare und reduzierbare Gase in einem einzigen Signal. Der hier untersuchte LUQAS-Sensor gehört zu dieser Klasse von Sensoren, die im Folgenden näher betrachtet werden.

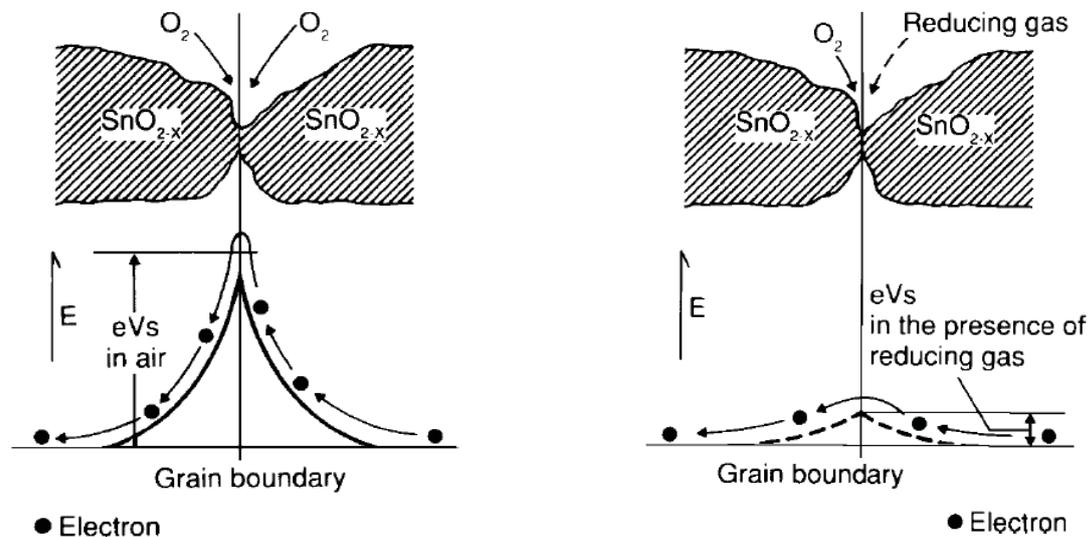
### 1.4.2 Messung mit oxidierbaren Halbleiter-Sensoren

Diese Gassensoren basieren auf dem Taguchi-Prinzip. Dabei wird eine Halbleiter-Wirkschicht oxidiert, in der Folge hängt dieser Prozess von der Verfügbarkeit von Luftsauerstoff ab. Sensoren mit diesem Funktionsprinzip gibt es seit 1965. Sie wurden erstmals von der Firma FIGARO produziert und eingesetzt.

TAGUCHI-Sensoren reagieren auf alle oxidierbaren und reduzierbaren Gase. Inerte Gase (etwa He, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> usw.) werden nicht detektiert. Gassensoren nach dem Taguchi-Prinzip haben in unbelasteter Luft einen definierten elektrischen Widerstand, der sich bei Angebot oxidierbarer Gase verringert und sich bei Angebot reduzierbarer Gase erhöht. Das gassensitive Material ist beheiztes Metalloxid, zum Beispiel Zinndioxid (SnO<sub>2</sub>). Zinndioxid wird mit katalytisch aktiven Substanzen (Pd, Pt) angereichert und in dünnen Schichten auf einem Träger (Substrat) aus Keramik oder Silizium aufgebracht. Auf dem Träger befinden sich Kontaktstrukturen (Interdigital-Strukturen), die die Messung elektrischer Eigenschaften der Wirkschicht ermöglichen, zum Beispiel den Widerstand der Wirkschicht.

Wird ein Metalloxidkristall wie SnO<sub>2</sub> in Luft auf eine höhere Temperatur aufgeheizt, so wird Sauerstoff auf der Oberfläche des Metalloxidkristalls mit einer negativen Ladung adsorbiert. Elektronen in der Kristalloberfläche werden auf den adsorbierten Sauerstoff übertragen, die Oberfläche des Kristalls wird positiv geladen. Die so entstandene Potentialbarriere hemmt

den Elektronenfluss, der als elektrischer Widerstand gemessen werden kann (Abbildung 1.4-1).



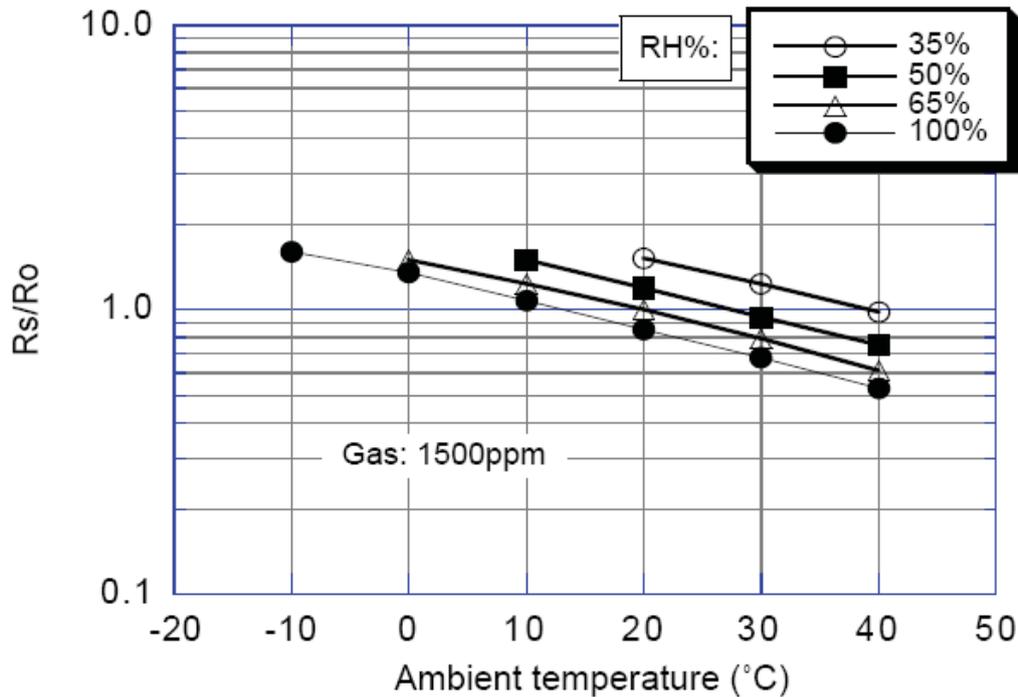
**Abbildung 1.4-1: Veränderung der Potenzialbarriere mit ohne oxidierbares Gas<sup>4</sup>**

Wird dem Sensor ein oxidierbares Gas angeboten, nimmt die Schichtdicke des negativ geladenen Sauerstoffs ab. Die Potenzialbarriere an den Korngrenzen wird kleiner und der elektrische Widerstand der Wirkschicht sinkt. Bei reduzierbaren Gasen wie Ozon oder Stickoxiden ist der Effekt genau umgekehrt, der elektrische Widerstand der Wirkschicht steigt.

Der gemessene elektrische Widerstand stellt daher ein Maß für die Konzentration eines oxidierbaren bzw. reduzierbaren Gases dar, wobei oxidierbare Gase (z. B. CO, VOC) den Widerstand vermindern und reduzierbare (z.B. O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>) ihn erhöhen.

Allerdings hängt der Widerstand außerdem von Temperatur und Feuchte (vgl. Abbildung 1.4-2) sowie von der „Geschichte“ (vorherige Begasungen) ab.

<sup>4</sup> Quelle: Figaro. Zitiert nach Rump, Hanns: Zuverlässige und kostengünstige „Künstliche Nase“ ETR-GmbH, Dortmund Sept. 2005



**Abbildung 1.4-2: Abhängigkeit eines Sensorsignals nach dem Taguchi-Prinzip von Temperatur und relativer Feuchte [Figaro]**

Diese Abhängigkeit von den Umgebungsgrößen sowie der „Memory“-Effekt führten dazu, dass die Halbleitersensoren – bzw. die Messgröße ohmscher Widerstand der Wirkschicht – nur begrenzt einsetzbar ist.

### 1.4.3 Messung mit dem „LuQaS“-Sensor

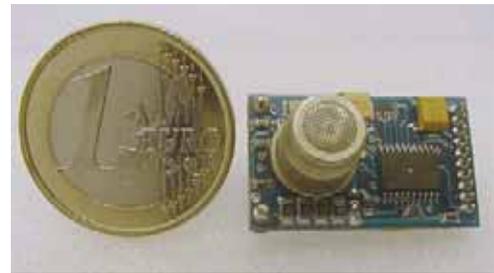
#### 1.4.3.1 Der LuQaS-Sensor

Die Probleme mit den klassischen Metalloxidsensoren nach dem Taguchi-Prinzip gaben Anlass zu einer Weiterentwicklung im Rahmen des Projekts „LuQaS I“. Ziel war die Reduzierung der Querempfindlichkeiten sowie reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, d.h. die Ausschaltung des Memory-Effekts.

Der entscheidende Schritt war hierbei ein neu entwickeltes Auswertungsverfahren. Das Mischgas-Sensorsystem wird auf eine Betriebstemperatur von 350 °C erwärmt. Anschließend wird die Temperatur der Wirkschicht zyklisch in kurzen Zeitabständen um diesen Betriebspunkt herum erhöht und erniedrigt und die originären Signale (Leitfähigkeitsveränderungen) werden als Antwort der Wirkschicht aufgezeichnet. Aus diesen Werten wird ein Signal des LUQAS Sensors generiert. Die Auswertung kann offenbar so erfolgen, dass die Effekte der Querempfindlichkeiten und der Vorbelastung weitgehend eliminiert werden können. Die Nullpunktstabilität und die Langzeitkonstanz wurden nach [Steimle 2003] auf diese Weise erheblich verbessert. Luftbelastungen werden so reproduzierbar erkannt. Diese Sensoren wur-

den zunächst für Kraftfahrzeuge eingesetzt, bei denen die Luftverunreinigungen durch exogene Quellen (Straßenverkehr) hervorgerufen werden.

Der LuQaS-Sensor (Abbildung 1.4-3) spricht offenbar vor allem auf oxidierbare Gase an. Auf Stickoxide und Ozon reagiert er nicht [Supply, 2007]. Der Sensor wurde wesentlich im Rahmen des Forschungsprojekts „LuQaS I“ [LuQaS I, 2001] im Zeitraum 1995 - 2000 entwickelt. Eine wesentliche Veränderung des in dem hier dokumentierten Projekt „Komfortlüftungsanlagen mit luftqualitätsgeführter Volumenstromregelung...“ eingesetzten Sensors gab es nach Angaben des Herstellers seit dieser Zeit nicht. Die wesentlichen Kenndaten des Sensors sind in Abbildung 1.4-4 zusammen gefasst.



**Abbildung 1.4-3: Ansicht LuQaS-Sensor [ETR]**

#### **Metalloxid-Sensor**

- Einfach-Sensor aus Zinndioxid als Dickfilm auf Keramik-Substrat
  - Sensor mit Temperaturregelung per Platin-Heizelement in isothermischem Gehäuse mit integrierter Glasfilterkappe als Diffusionsabdeckung
  - Sensortemperaturen zwischen 300° und 400°C, Stabilisierung auf  $\pm 0,1$  K genau
  - Interaktives dynamisches Verfahren zur Ansteuerung des Sensors und zur Interpretation der resultierenden Signale, realisiert auf kompakter Platine mit integriertem Sensor
  - Breitbandige Messung, d. h. summarische Erfassung verschiedener Gase und Dämpfe in der Raumluft durch spezielle interaktive Sensorauswertung
- Option: ausgeprägte Selektivität für bestimmte Gase

#### **Detektierbare Substanzen**

- Simultane Detektion oxidierbarer Gase (und Dämpfe), insbesondere VOC (volatile organic compounds - flüchtige, leicht oxidierbare organische Substanzen)

Konkret:

- Ausdünstungen von Möbeln, Bürogeräten und von im Raum Anwesenden
- Viele Tabakrauchbestandteile, insbesondere Kohlenmonoxid (CO)

- Essensgeruch
- Kohlenwasserstoffe, Ammoniak, Alkohole, Benzole u. a. Lösungsmittel

#### **Empfindlichkeit**

- Konzentrationen von  $< 10$  ppm bis 15.000 ppm können ohne Quereinflüsse und reproduzierbar detektiert werden

#### **Messgenauigkeit**

- Nullpunktstabil und frei von Quereinflüssen
- Integriertes Auswerteverfahren gleicht fertigungsbedingte Bauteiltoleranzen weitgehend aus (Fehler max. 3%)
- Messwert unabhängig von der Lufttemperatur
- Messwert weitgehend unabhängig von der Luftfeuchte (Fehler max. 5%)

#### **Relativer Messfehler**

- Angabe nicht möglich, da es sich um ein gewichtetes Summensignal handelt, das empirisch optimiert wurde

#### **Ansprechzeit $t_{90}$**

- einstellbar,  $< 5$  Sekunden möglich

#### **Reproduzierbarkeit** (relative Abweichung)

- $< \pm 10\%$

**Abbildung 1.4-4: Übersicht LuQaS-Sensor [BINE, 2001]**

Der LuQaS ist damit ein Sensor für oxidierbare Gase (nicht nur VOC), der gleichzeitig mit einer eindimensionalen Projektion eine Bewertung dieser Luftverunreinigungen vornimmt – allerdings ohne ein transparentes Bewertungsschema. Der Sensor stellt nach außen eine „black box“ dar, deren genaues Verhalten auf spezifische Gase oder Quellen erst erforscht werden muss. Die von ETR angegebenen Ansprechempfindlichkeiten sind in Tabelle 1-8 angegeben.

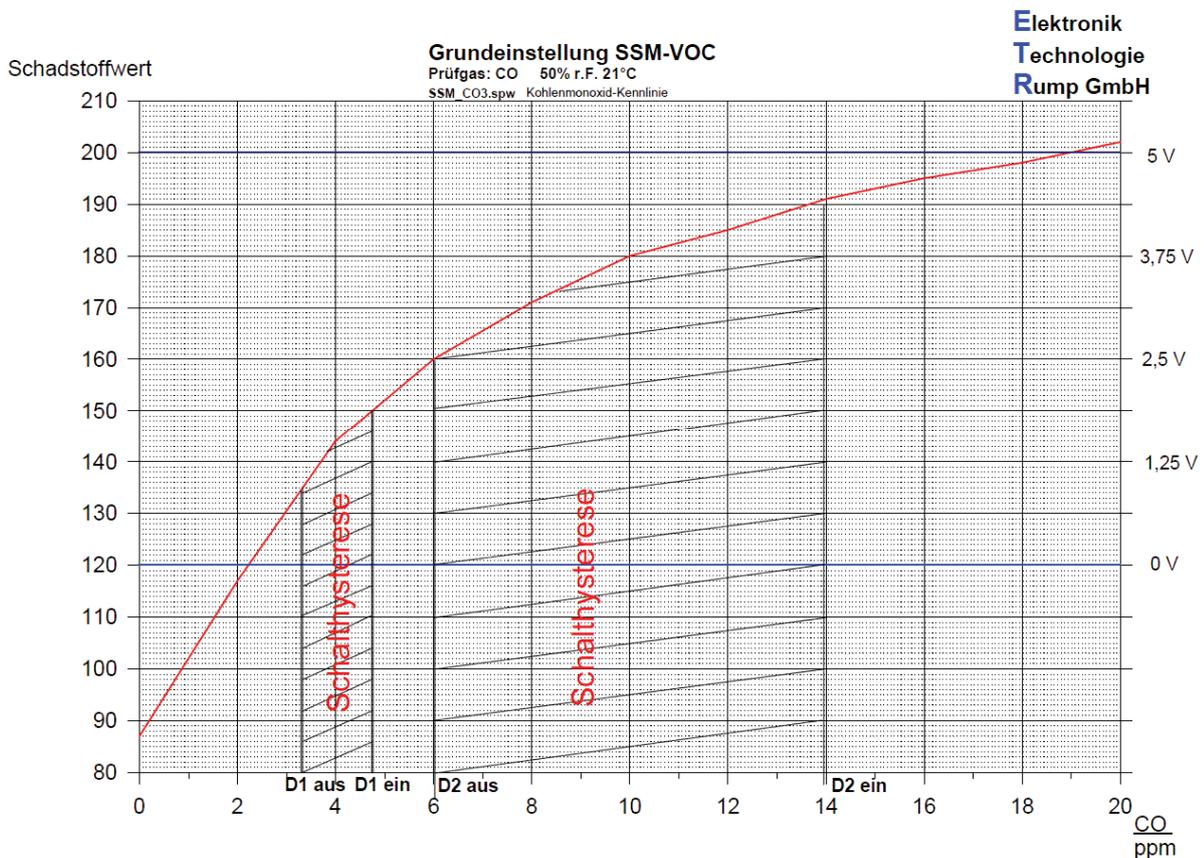
**Tabelle 1-8: Ansprechempfindlichkeiten des LuQaS-Sensors nach Herstellerangaben**

**Ansprechempfindlichkeit ETR - Sensorik**

Cyclohexane	< 5 ppm
Carbon monoxide	< 20 ppm
Phosgene	< 10 ppm
Ethylene oxide	< 4 ppm
Hydrogenen cyanide	< 7 ppm
Ethylamine	< 10 ppm
Formaldehyde	< 10 ppm
Butan	< 3 ppm
Propan	< 5 ppm
Wasserstoff	< 1 ppm

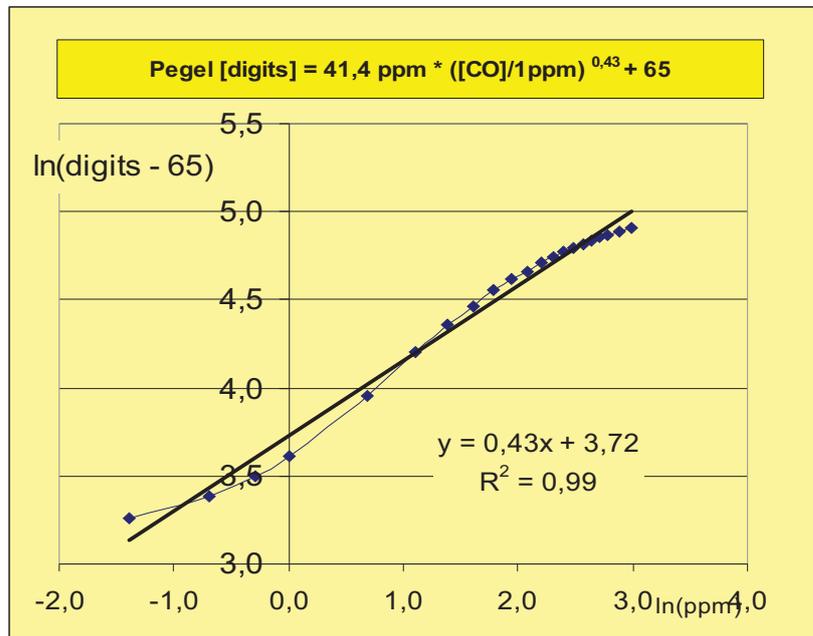
**1.4.3.2 Abhängigkeit der Sensorsignale von Stoffkonzentrationen**

Der LuQaS-Sensor gibt als (Summen-)Messsignal einen Wert zwischen 80 und 254 aus. Daraus lässt sich aufgrund des Messprinzips jedoch nicht auf die Konzentration einer bestimmten Substanz schließen. Es ist lediglich möglich, das Sensorsignal mit einer bestimmten Konzentration eines Kalibrierungsgases zu vergleichen.



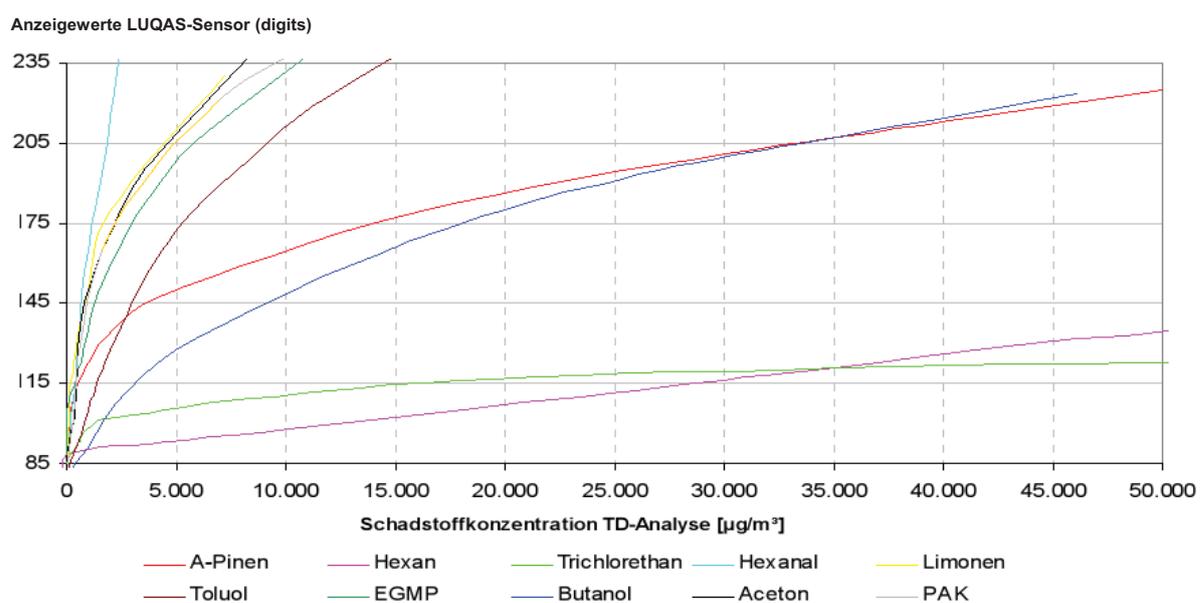
**Abbildung 1.4-5: Sensorsignal in Abhängigkeit von der CO-Konzentration [ETR]**

Als Kalibriergase werden Kohlenmonoxid und Cyclohexan verwendet. Die Abhängigkeit des Sensorsignals von Kohlenmonoxid zeigt Abbildung 1.4-5. Der Zusammenhang ist sublinear, annähernd logarithmisch, wobei die Regression auch hier eine deutliche Abweichung erkennen lässt (Abbildung 1.4-6). Insbesondere ist das LuQaS-Signal nicht additiv.



**Abbildung 1.4-6: Sensorsignal in Abhängigkeit von der CO-Konzentration (Auswertung der Herstellerangabe)**

Im Rahmen des LuQaS II-Verbundprojekts wurden mit dem Sensor Erfahrungen gesammelt. Gemessene LuQaS-Sensorsignale in Abhängigkeit von Konzentrationen verschiedener Stoffe zeigt Abbildung 1.4-7.



**Abbildung 1.4-7: Abhängigkeit des LUQAS-Signals von der Stoffkonzentration bei verschiedenen Substanzen [UTEK, Schlussbericht Lüftungsampel]**

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- Der LuQaS-Sensor misst oxidierbare Gase
- Jedes Gas hat seine eigene Charakteristik
- Der Zusammenhang zwischen Konzentration und Sensorsignal ist sublinear
- Es gibt keine „Additionstheorem“ für die kombinierte Wirkung verschiedener Gase.

### 1.4.3.3 Messungen in einem Seminarraum der Universität Essen

Im Rahmen des Forschungsverbandsprojekts „LuQaS II“ wurden in einem Seminarraum der Universität Essen Sensoren in der Zu- und Abluft eingebaut. Abbildung 1.4-8 zeigt den Messaufbau, Abbildung 1.4-9 die Messwerte und Abbildung 1.4-10 die Signaländerungen des LuQaS-Sensors sowie eines CO<sub>2</sub>-Sensors in Abhängigkeit von der personenbezogenen Lüftungsrate. Daraus lassen sich indirekt Schlussfolgerungen ziehen auf die Abhängigkeit zwischen der Luftqualität und den Sensorsignalen, weil die Änderung der Luftqualität auf die anwesenden Personen zurückzuführen sein dürfte. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration ist erwartungsgemäß umgekehrt proportional zur personenbezogenen Lüftungsrate. Der Zusammenhang zwischen Lüftungsrate und LuQaS-Sensorsignal sieht relativ linear aus und deutet generell auf eine sublineare Abhängigkeit des Signals von den gemessenen Gaskonzentrationen hin.

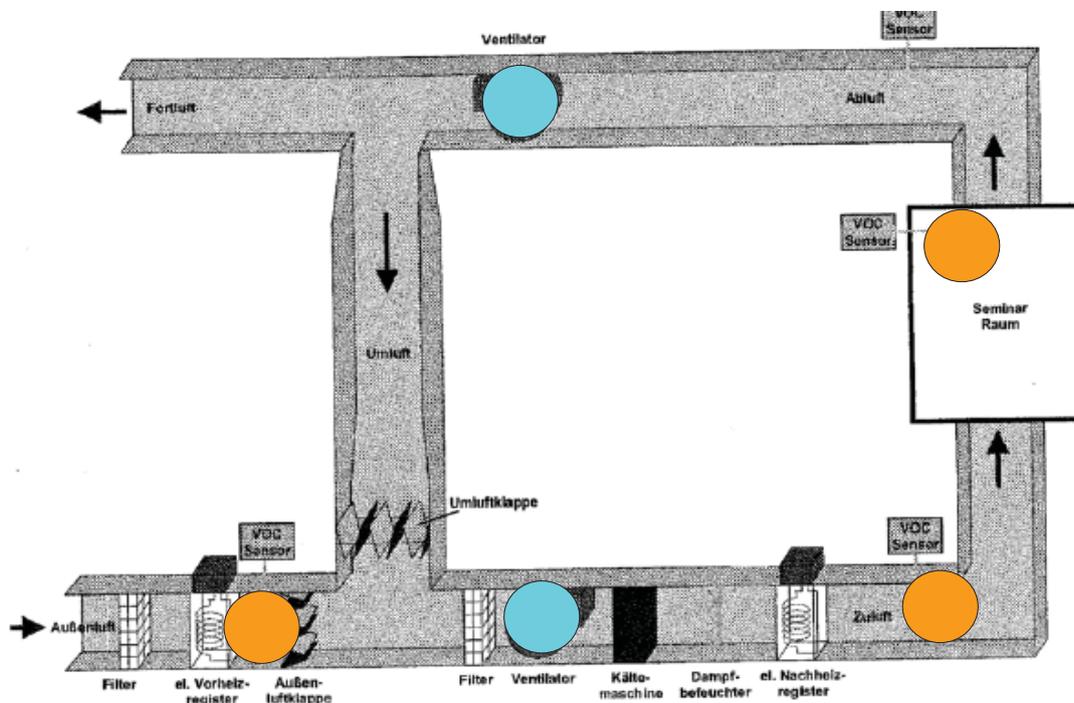
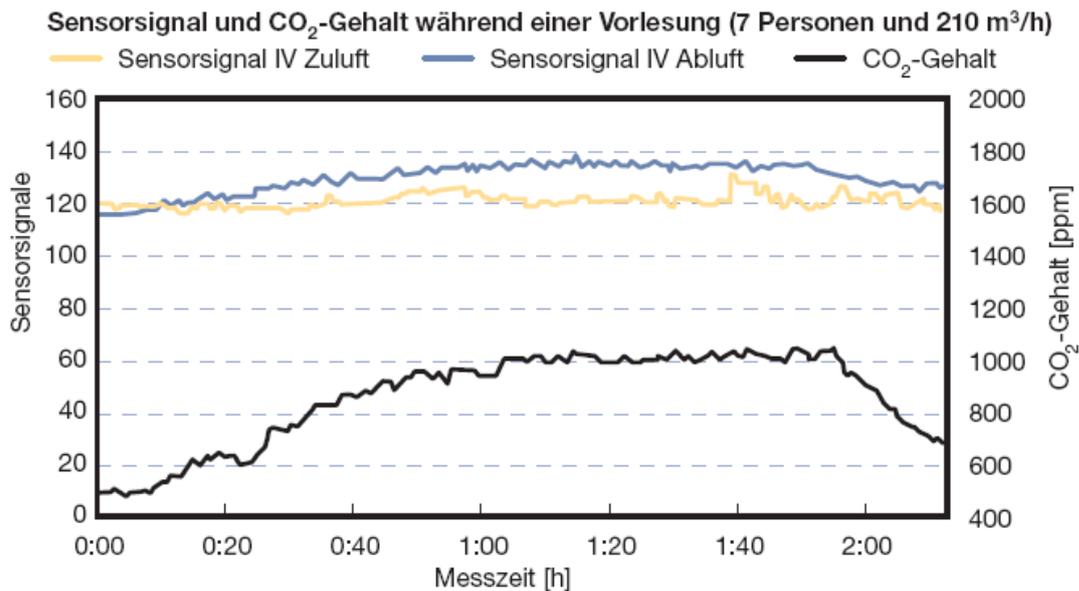
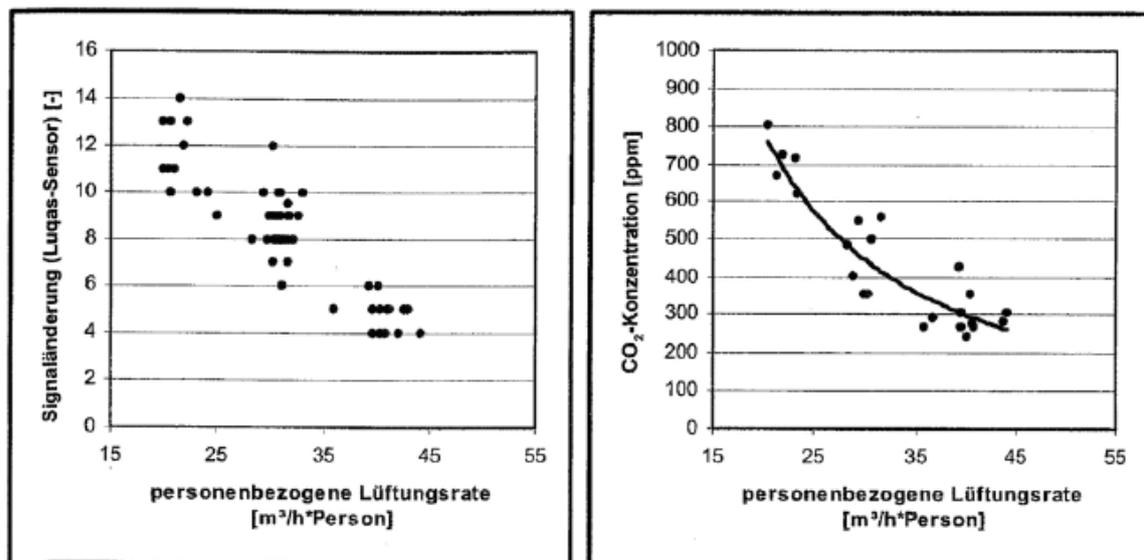


Abbildung 1.4-8: Messaufbau in einem Seminarraum in Essen [Quelle: Steimle et al., 2004]

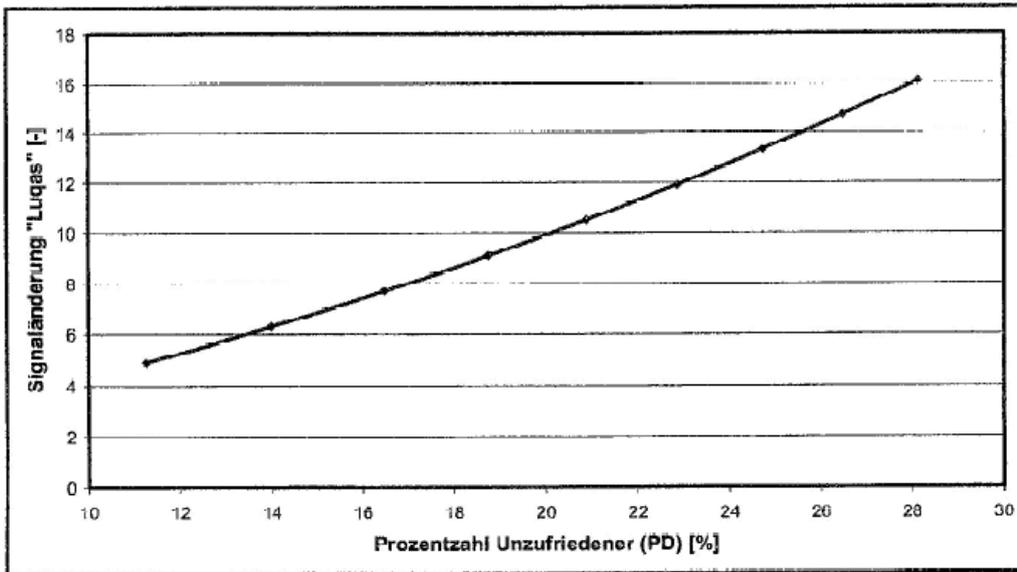


**Abbildung 1.4-9: : Messergebnisse: CO<sub>2</sub>-Konzentration und LuQaS-Sensor [Quelle: Steimle et al., 2004]**



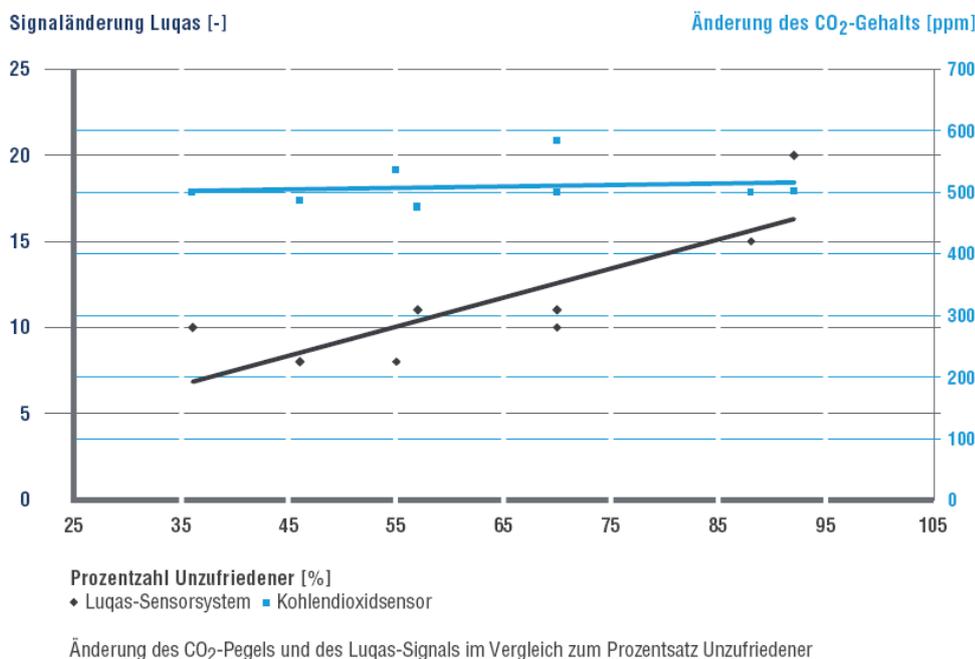
**Abbildung 1.4-10: Signaländerungen des LuQaS-Sensors und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Abhängigkeit von der personenbezogenen Lüftungsrate unter Berücksichtigung der Außenluftqualität [Quelle: Steimle et al., 2004]**

Ein Indikator für die Geruchsbelastung ist die Anzahl Unzufriedener (s. o.). Ein Zusammenhang zwischen dieser Größe und dem Sensorsignal (in Digits) wird ebenfalls von Steimle angegeben (Abbildung 1.4-11).



**Abbildung 1.4-11: Zusammenhang zwischen dem LuQaS-Sensor (Änderung des Sensor-Signals in „Digits“) und der „Anzahl Unzufriedener (PPD)“ [Steimle et al., 2004]**

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 1.4-12 Messungen der Firma ALKO für das Produkt „Air-Qualitizer“ [Alko, 2007], in dem der LuQaS-Sensor eingesetzt wird. Der Air Qualitizer besitzt offensichtlich eine andere Skala als der klassische LuQaS-Sensor. Die Messungen (mit Befragungen) wurden von Alko neu durchgeführt.



**Abbildung 1.4-12: Zusammenhang zwischen der Anzeige des „Air-Qualitizers“ (Änderung des Sensor-Signals) und der „Anzahl Unzufriedener (PPD)“ [Alko, 2007]**

Über die Anzahl Unzufriedener lässt sich auf die Luftqualität zurückrechnen. Für den Original-Luquas-Sensor würde sich ein Wert von 7 Digits pro dezipol ergeben (vgl. Abbildung 1.4-13 und Abbildung 1.4-14). Die Subadditivität kann aber offensichtlich mit dieser Messung nicht nachvollzogen werden.

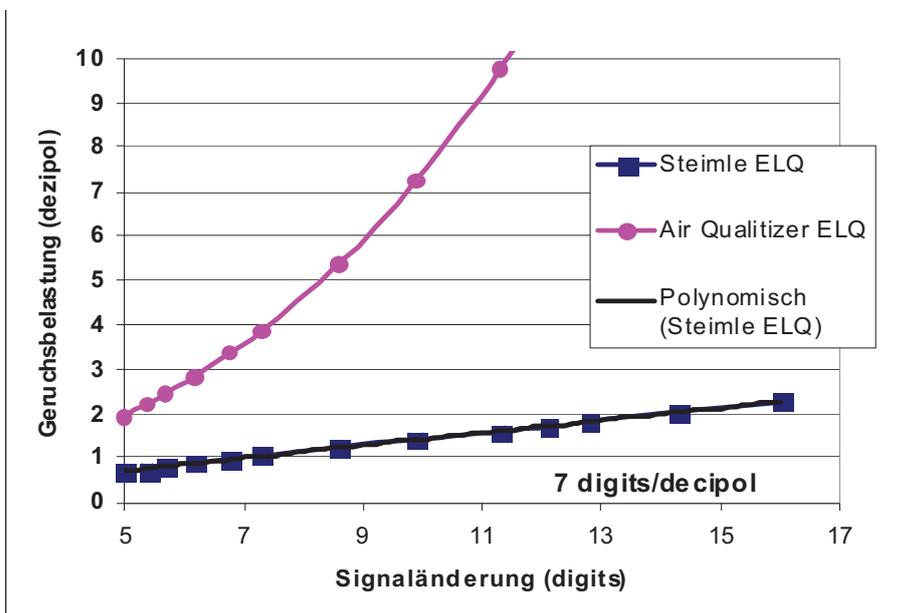


Abbildung 1.4-13: Signaländerung und Luftqualität in dezipol

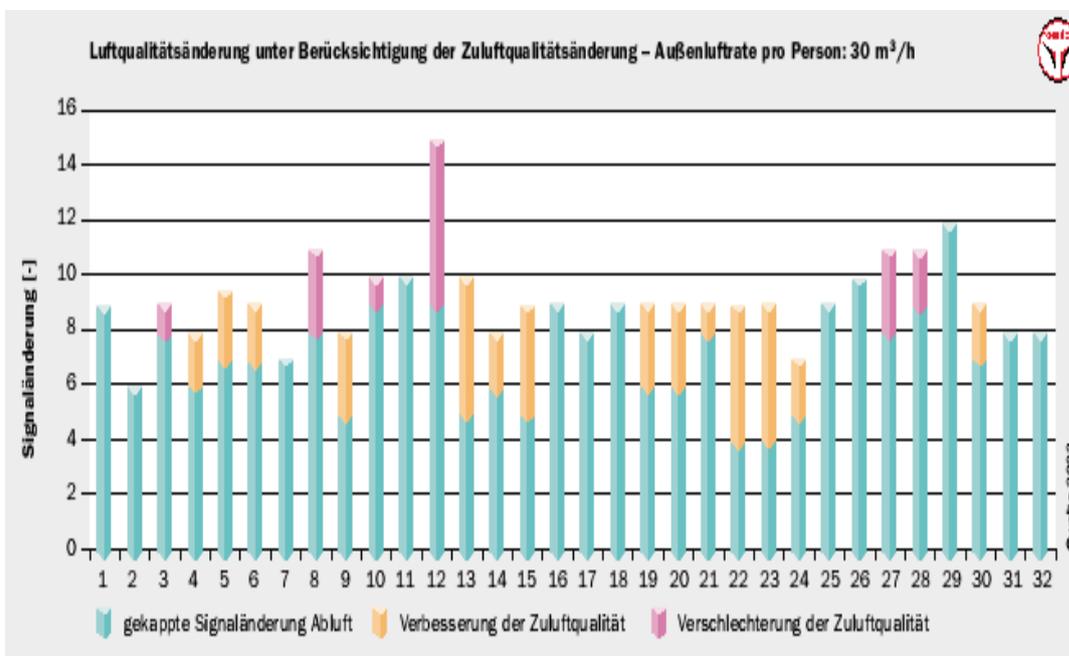


Abbildung 1.4-14: Messwerte zur Änderung des Sensor-Signals in „Digits“ bei einer Außenluftfrate von 30 m<sup>3</sup> pro Person [Steimle & Wetzel., 2003]

### 1.4.3.4 Messungen an der BA Mosbach

Ebenfalls im Rahmen von LuQaS II wurden Messungen in einem Vorlesungssaal der BA Mosbach durchgeführt. Auch hier folgt das LuQaS-Signal weitgehend den Änderungen der ebenfalls gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentration.

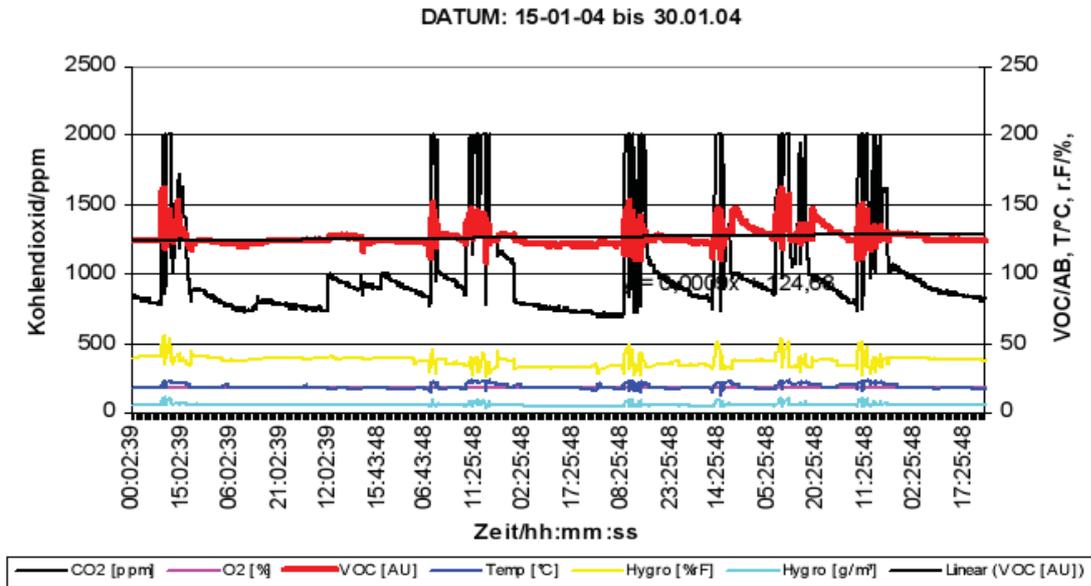


Abbildung 1.4-15: Messung von CO<sub>2</sub>, VOC (LuQaS), Feuchte und Temperatur in einem Vorlesungssaal der BA Mosbach [Abschlussbericht von LuQaS II]

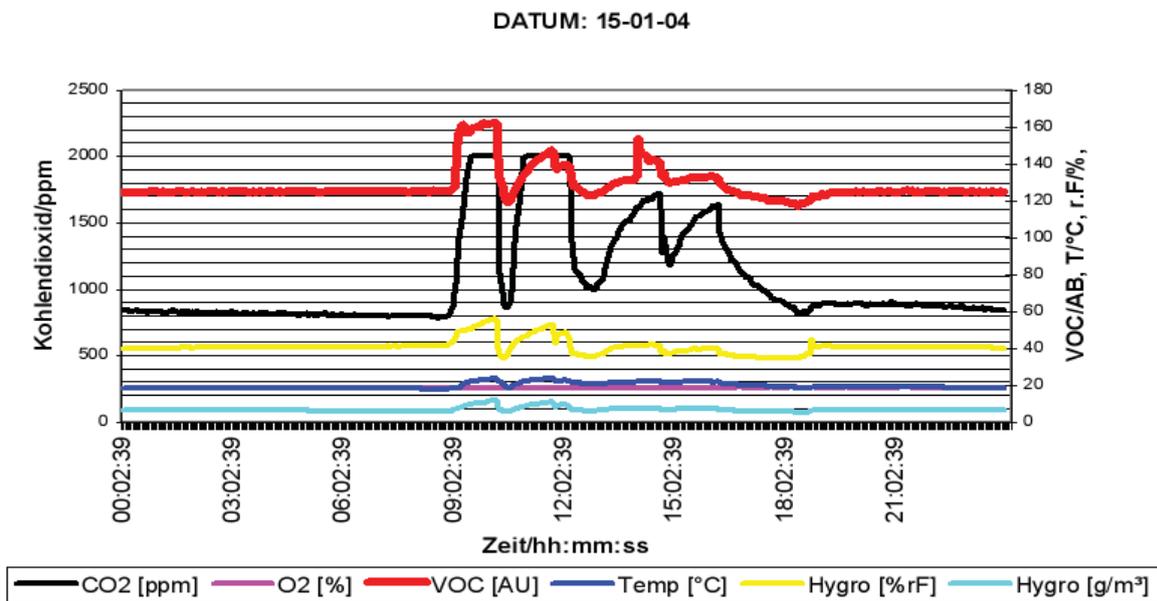
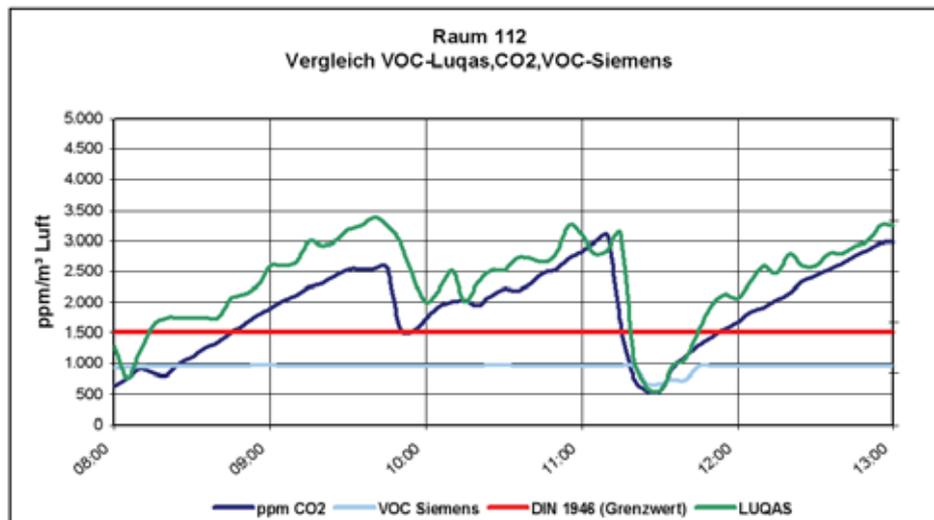


Abbildung 1.4-16: Messung von CO<sub>2</sub>, VOC (LuQaS), Feuchte und Temperatur in einem Vorlesungssaal der BA Mosbach [Abschlussbericht von LuQaS II]

In Abbildung 1.4-16 ist gut zu erkennen, dass das Signal des LuQaS teilweise einen ähnlichen Verlauf aufweist wie die CO<sub>2</sub>-Messwerte, dieser Zusammenhang aber nicht an allen Tagen gleich stark ausgeprägt ist. Weiterhin ist der Signalhub deutlich kleiner.

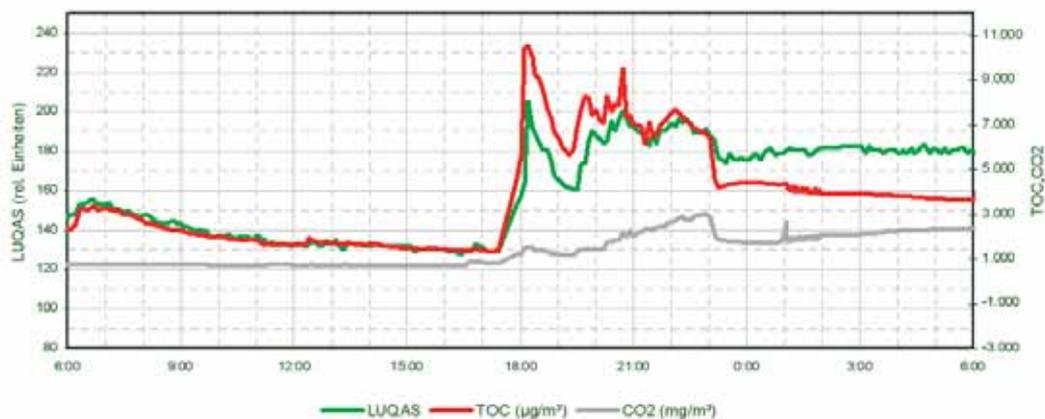
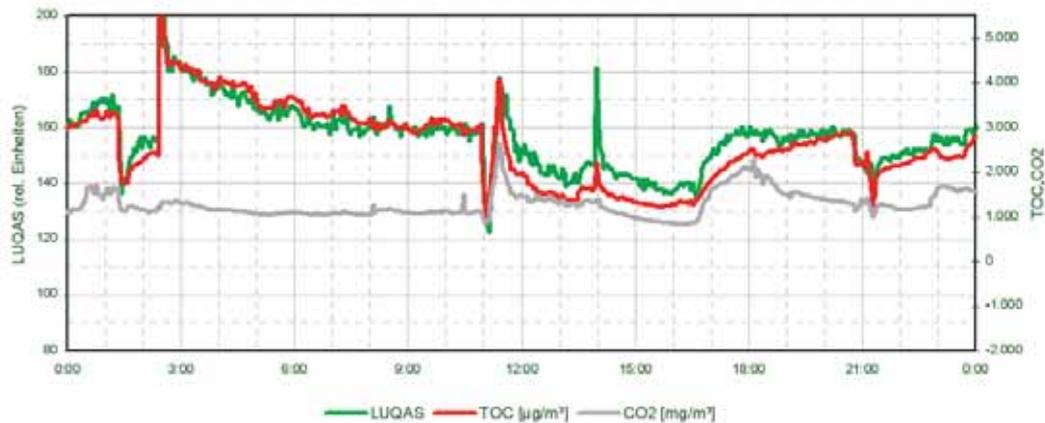
### 1.4.3.5 Messungen in Schulen und Wohngebäuden im Rahmen der Entwicklung einer Lüftungsampel (LuQaS II)

Im Rahmen der Entwicklung einer Lüftungsampel wurden von UTEC eine Reihe von Untersuchungen mit dem LuQaS-Sensor durchgeführt. Insgesamt 5 Schulen und 15 Wohnungen in Ein- und Mehrfamilienhäuser waren in das Forschungsprojekt einbezogen, 3 der Wohnungen waren auswertbar.



**Abbildung 1.4-17: Messung von CO<sub>2</sub> und VOC in einem Klassenraum; VOC-Werte wurden mit dem LuQaS-Sensor und einem Mischgassensor der Firma Siemens [UTEC]**

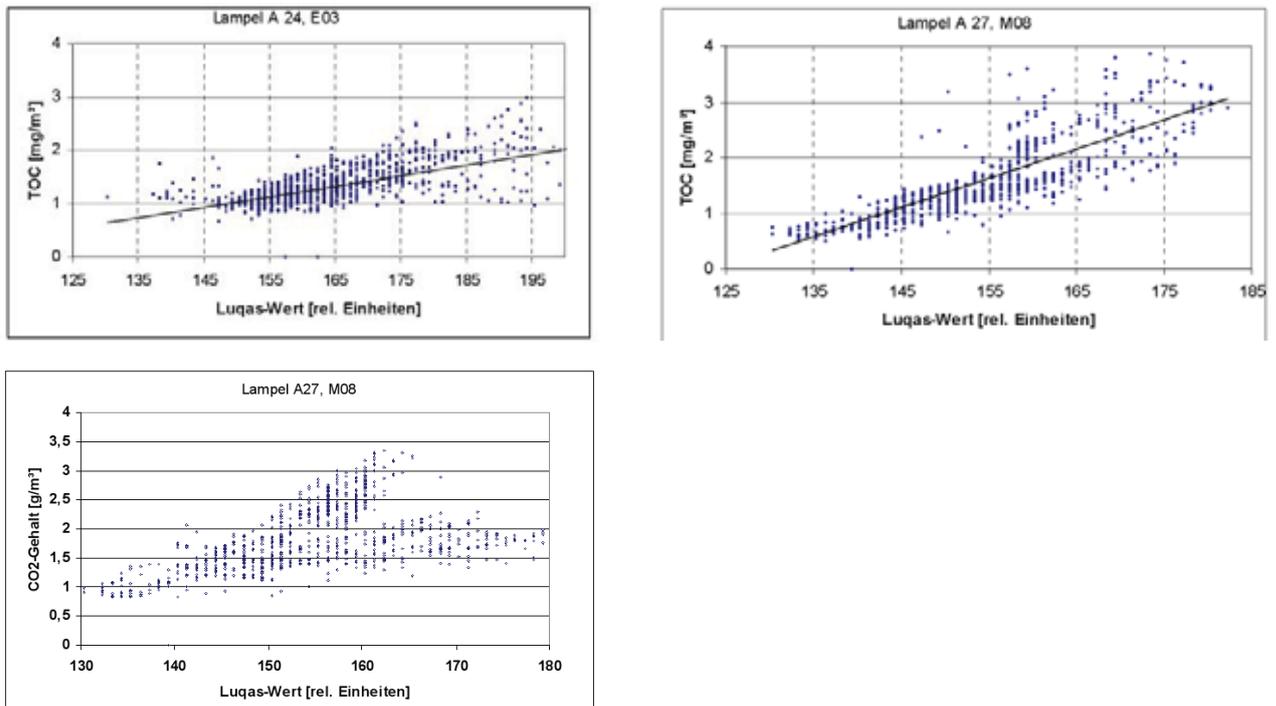
In einem Klassensaal (Abbildung 1.4-17) zeigte sich auch hier, dass Sensorsignal und CO<sub>2</sub>-Konzentration weitgehend parallel verlaufen. In Wohngebäuden, in denen auch Belastungen aus nicht personengebundenen Quellen auftreten, ist diese Kopplung durchbrochen. Dies zeigt Abbildung 1.4-18. Zusätzlich ist hier eine Vergleichsmessung mit einem photoakustischen Monitor durchgeführt worden (TOC „total organic compounds“). TOC und LuQaS-Signal verlaufen in weiten Bereichen, aber nicht vollständig, parallel.



**Abbildung 1.4-18: Messung von CO<sub>2</sub> und VOC mit dem LuQaS-Sensor und einem photoakustischen Monitor in verschiedenen Räumen einer Wohnung [UTEC, Lüftungssampelp Teilbericht 2]**

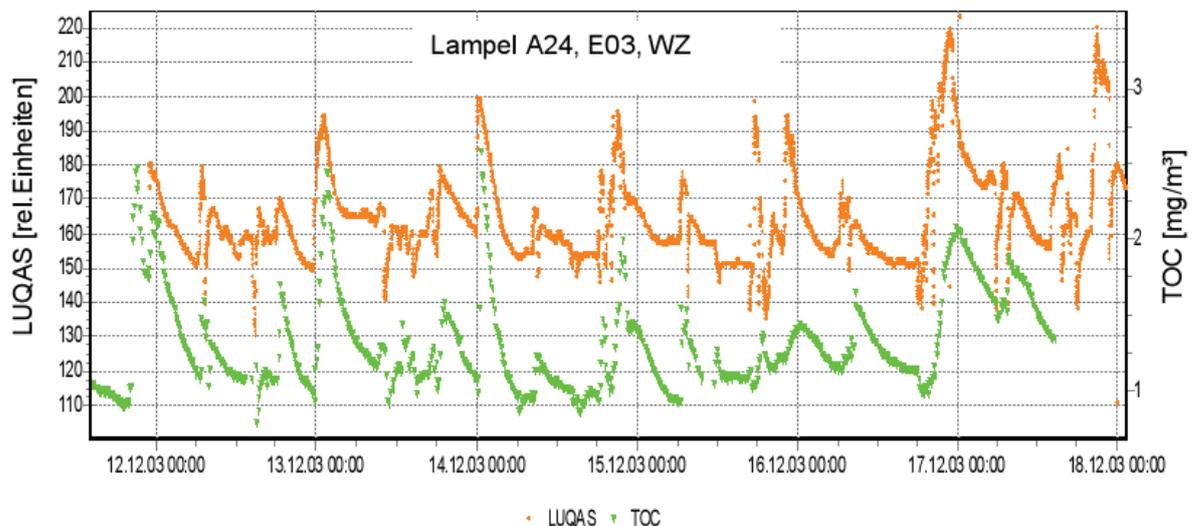
Eine Korrelationsanalyse zeigt Abbildung 1.4-19. Dabei ist die Verwendung des „TOC“ als Vergleichswert auch nicht unproblematisch. Es wurde im Rahmen der Untersuchung exemplarisch festgestellt, dass in den hier vorliegenden Anwendungsfällen die Beziehung zwischen TVOC und TOC monoton ist.

Bei Messungen mit LuQaS-Sensoren in verschiedenen Räumen wurde festgestellt, dass die Messposition im Raum kaum eine Rolle spielt (empfohlen zwischen Tischhöhe und Nase), dass die Grundbelastungen in Räumen bzw. Wohnungen variieren und dass bei geöffneten Innentüren alle Räume Veränderungen in einem Raum gedämpft und verzögert in anderen Räumen gemessen werden. Keine der untersuchten Wohnungen und Häuser verfügte über eine mechanische Lüftungsanlage, die eine gerichtete Durchströmung der Wohnung sicherstellt.

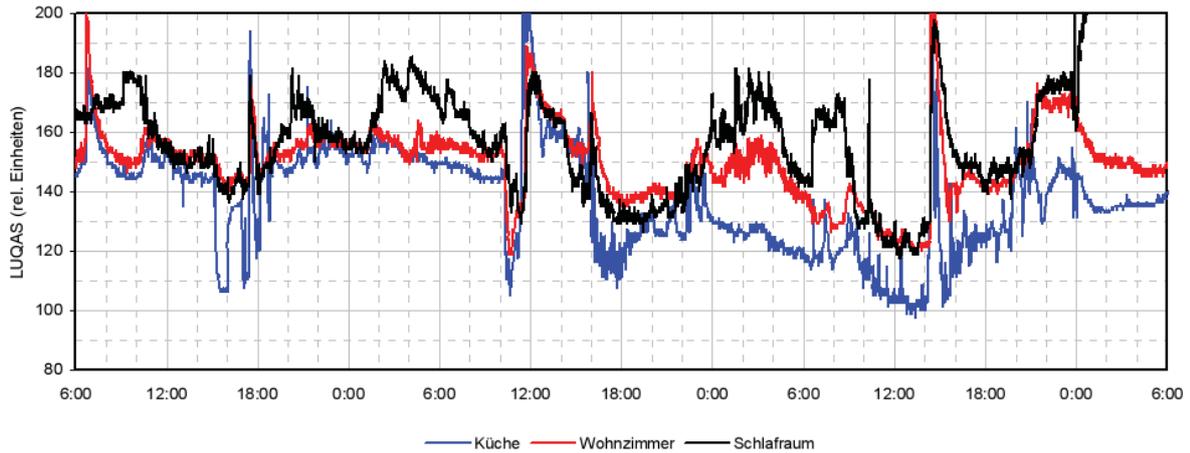


**Abbildung 1.4-19: TOC, CO<sub>2</sub> und LuQaS-Sensor in einem Einfamilienhaus und in einem Mehrfamilienhaus [UTEC, Lüftungsampel Teilbericht 4]**

Abbildung 1.4-20 zeigt über mehrere Tage den Verlauf der LuQaS- und der TOC-Werte. Die Verteilung liegt zwischen 135 und 220 Digits, der Mittelwert liegt bei ca. 165 Digits. Abbildung 1.4-21 zeigt Messwerte aus unterschiedlichen Räumen einer Wohnung.

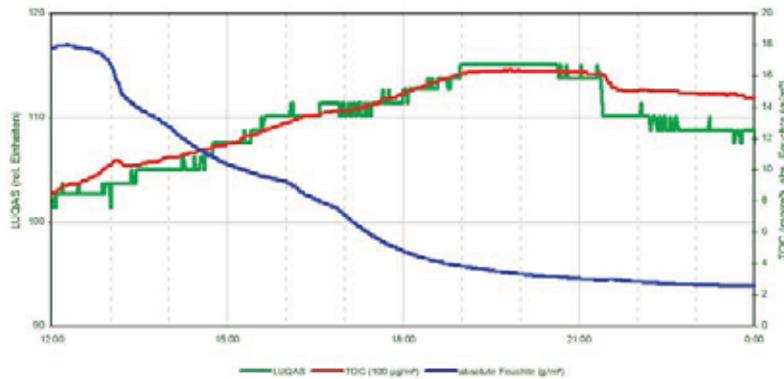


**Abbildung 1.4-20: TOC und LuQaS-Sensor in einem Einfamilienhaus im Zeitverlauf [UTEC, Lüftungsampel Teilbericht 4]**

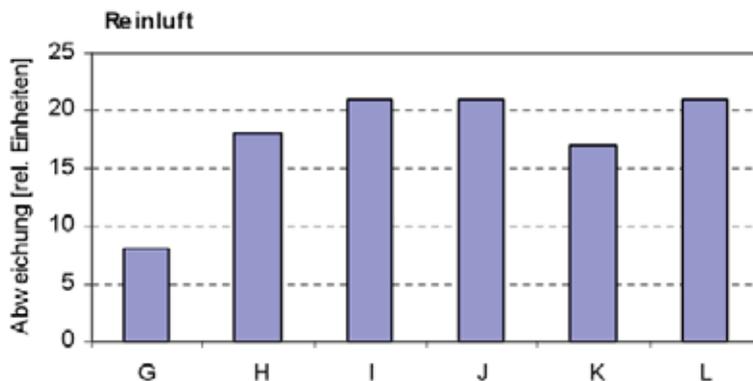


**Abbildung 1.4-21: Messungen mit dem LuQaS-Sensor in verschiedenen Räumen einer Wohnung [UTEC, Lüftungsampel Teilbericht 2]**

Messungen, die innerhalb des LuQaSII-Projekts mit dem Luftqualitätssensor zu Langzeitdrift und Abhängigkeit von Umgebungstemperatur gemacht wurden, zeigen, dass die Effekte wesentlich geringer sind als bei den originalen Metalloxid-Sensoren, konnten aber die Aussagen des Herstellers nicht völlig bestätigen (vgl. Abbildung 1.4-22).



**Abbildung 11 Reaktion der LUQAS-Sensoren auf langsamen Feuchteabfall (T=27°C)**



**Abbildung 1.4-22: Messungen mit dem LuQaS-Sensor zur Feuchteabhängigkeit und zur Langzeitdrift [UTEC, Lüftungsampel Teilbericht 2]**

### 1.4.3.6 Messungen in der Bibliothek der Universität Bremen

Im Rahmen des Projekts „Gosub“ wurden umfangreiche Messungen in der Universitätsbibliothek in Bremen durchgeführt [Gosub, 2003]. Aufgrund sehr hoher Luftwechselraten wurde nur in wenigen Räumen eine nennenswerte Veränderung des Signals im Tagesverlauf gemessen (Abbildung 1.4-23). Auffallend war, dass ein großer Teil der Personen mit der Luftqualität nicht zufrieden war, obwohl dies anhand der Messergebnisse mit dem LuQaS nicht nachvollziehbar war.

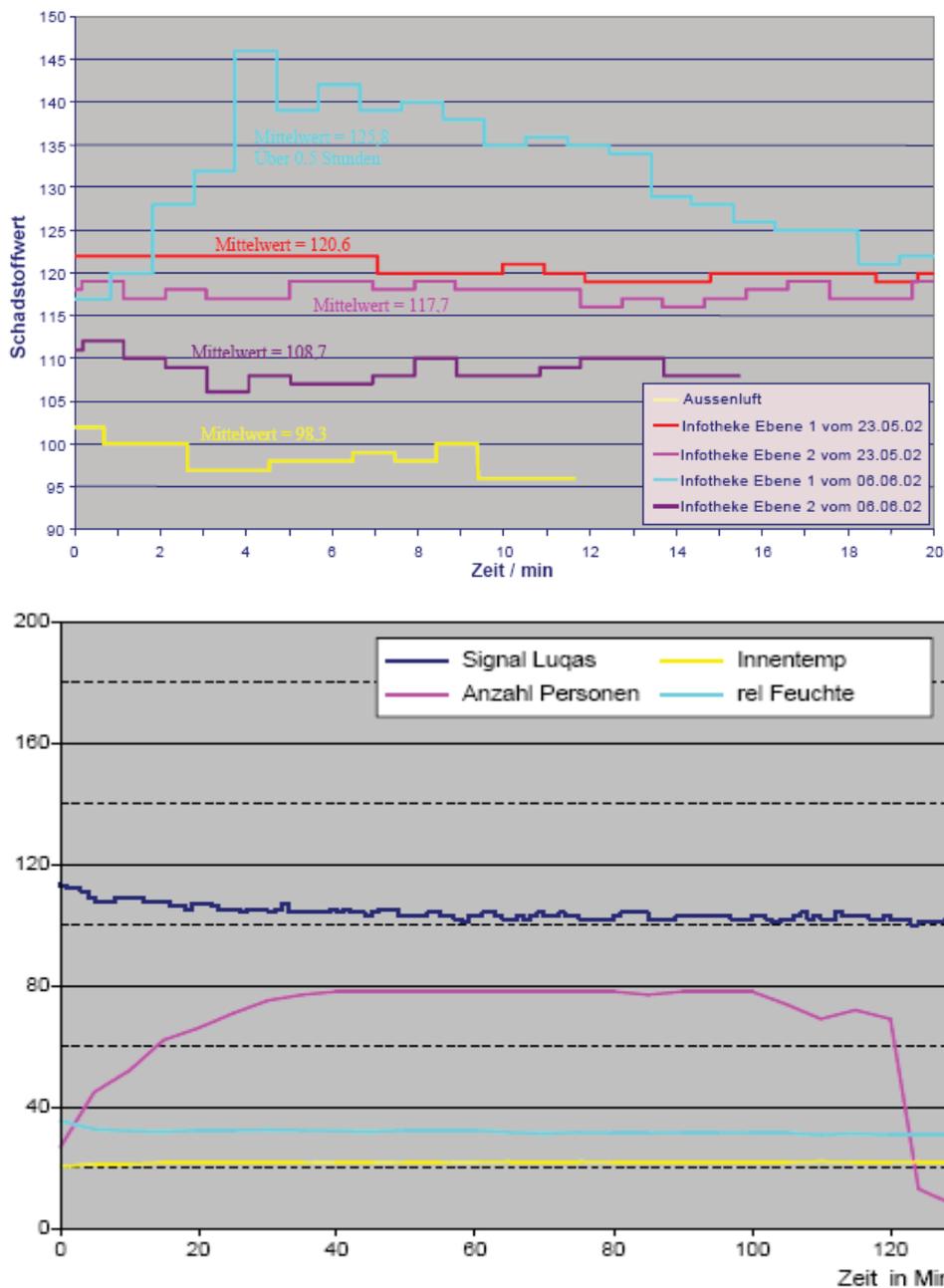
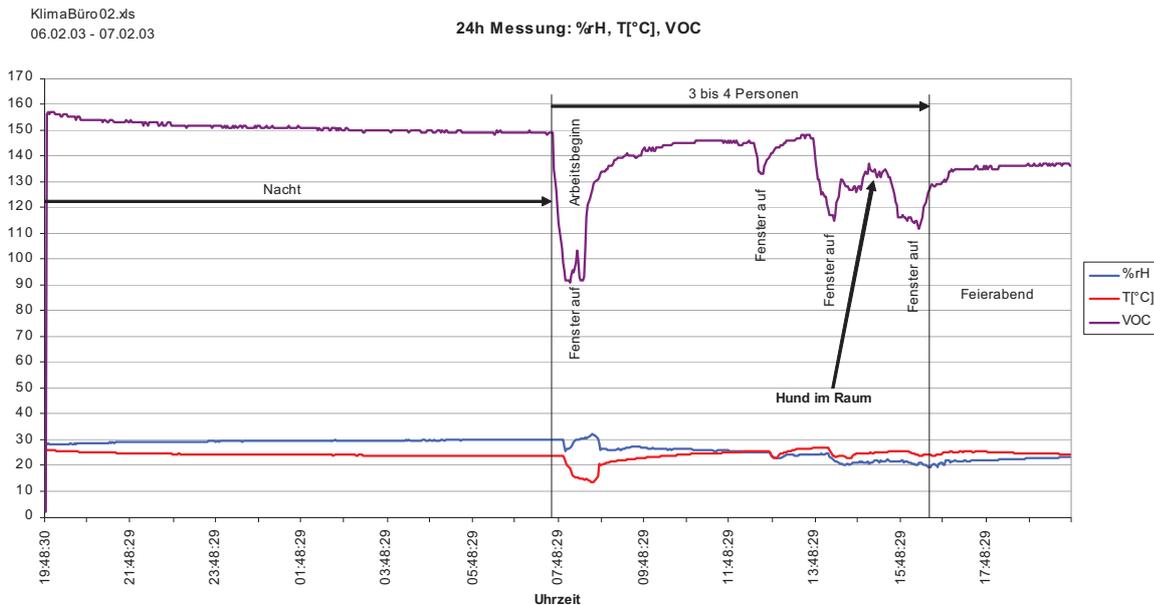


Abbildung 1.4-23: Messungen mit dem LuQaS-Sensor in der Universitätsbibliothek Bremen [TTZ Bremerhaven, 2003]

### 1.4.3.7 Messungen in einem Büroraum

In der folgenden Abbildung 1.4-24 sind Messungen wiedergegeben, die vom Hersteller ETR zur Verfügung gestellt wurden. Deutlich zu erkennen sind die Veränderungen aufgrund anwesender Personen sowie auf dokumentierte Ereignisse (Fensteröffnen, Tiere, ...).



**Abbildung 1.4-24: Verlaufsmessungen mit dem LuQaS-Sensor in einem Büroraum [ETR]**

Die Muster sind reproduzierbar. Eine zusätzliche Person bewirkt einen Anstieg um 5-10 Digits. Man erkennt auch, dass die Außenluft eine geringere Belastung (im Sinne des Sensors) hat, denn beim Fensteröffnen sinken die Werte schnell ab. Auch in der Nacht bleiben die Werte höher als die der Außenluft, so dass eine personenunabhängige Ursache im Gebäude ausgemacht werden muss. In diesem Bürogebäude könnte man daher die Messwerte nicht für eine Regelung benutzen, sofern nach absoluten Pegeln geregelt wird.

## 1.5 Regelungsansätze

### 1.5.1 Grundsätze

Die Konzentrationsänderung eines Stoffes folgt folgender Differentialgleichung:

$$\begin{aligned} \frac{dC_{Raum}}{dt} &= \frac{\dot{V}_Q}{V} + n (C_{Ziu} - C_{Ab}) \\ &= \frac{\dot{V}_Q}{V} + \varepsilon n (C_{Ziu} - C_{Raum}) \\ &= \frac{\dot{V}_Q}{V} + \frac{1}{\bar{T}} (C_{Ziu} - C_{Raum}) \end{aligned}$$

Dabei sind:

$C_{Raum}$  = Raumluftkonzentration [g/m<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, ppm,..]

$\dot{V}_Q$  = Einbringungsrate des Stoffes

$C_{Zu}$  = Zuluftkonzentration [g/m<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, ppm,..]

$C_{Ab}$  = Abluftkonzentration [g/m<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, ppm,..]

$V$  = Raumluftvolumen (m<sup>3</sup>)

$n$  = Luftwechselrate [1/s]

$\varepsilon$  = Lüftungseffektivität [-]

Dabei ist die Lüftungseffektivität bestimmt durch das Verhältnis von mittlerer Verweildauer zu nominaler Zeitkonstante  $\varepsilon = 1/(n \cdot \bar{T})$ . Die Zeitkonstante bei vollständiger Durchmischung ist  $1/n$  daher ist in diesem Fall  $\varepsilon = 1$ .

Die Lüftungseffektivität lässt sich aus dem Konzentrationsverlauf in der Abluft bestimmen:

$$\varepsilon = (C_{Zu} - C_{Ab}) / (C_{Zu} - C)$$

Dies gilt strenggenommen nur in einem quasistationären Zustand.

Bei konstanter Zufuhr im Raum ist die Gleichgewichtskonzentration gegeben durch

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\dot{V}_Q}{V} + \varepsilon n (C_{Ziu} - C_{Raum}) \quad \text{bzw.} \\ C_{Raum} &= C_{Zu} + \frac{\dot{V}_Q}{\varepsilon n V} \end{aligned}$$

Grundsätzlich bedeutet der Stoffaustausch über die Lüftung auch einen Energiefluss, der proportional zu Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft ist:

$$\dot{Q}_L = \rho_L n V (T_i - T_a)$$

Dabei sind

$$\begin{aligned}\dot{Q}_L &= \text{Wärmestrom} \\ V &= \text{Raumluftvolumen}\end{aligned}$$

In mitteleuropäischem Klima ist die Heizperiode gekennzeichnet durch eine dauerhafte tagesdurchschnittliche Außenlufttemperatur, die die Soll-Innenraumtemperatur unterschreitet. Kurzfristige Temperaturschwankungen werden durch die Gebäudemasse ausgeglichen. Damit ist eine Temperaturabweichung durch Zufuhr von Heizwärme auszugleichen und keine Aufgabe der Lüftungsanlage. Kurzfristige dynamische Effekte spielen eine untergeordnete Rolle.

Anders sieht es während des Sommers aus: heiße und strahlungsreiche Perioden können zu Übertemperaturen führen, insbesondere dann, wenn außerdem noch hohe innere Lasten in den Wohn- oder Arbeitsräumen vorhanden sind. Die wichtigste Maßnahme zur Begrenzung von Übertemperaturen ist die Reduzierung innerer Lasten, die nächst wirksamste Maßnahme ist eine Erhöhung des Luftwechsels. Wegen des Einflusses der Solarstrahlung und der inneren Lasten ist es (nach einer Einschwingphase) im Durchschnitt im Innenraum wärmer als außen. Aus diesem Grund kann bereits eine dauerhafte Erhöhung des Luftwechsels (bei Wärmerückgewinnung mit Bypass oder über Fenster) während des Sommers die Temperaturen erniedrigen [Feist et al, 2003]. Am wirkungsvollsten ist diese Maßnahme, wenn bereits vor dem Einsetzen von Hitzeperioden damit begonnen wird, weil dann die Gebäudemasse bereits zu Beginn der Hitzeperiode kälter ist. Eine größere Wirksamkeit hat die Lüftung dann, wenn sie vorwiegend bei niedrigerer Außenlufttemperatur eingesetzt wird, vor allem nachts. Eine Regelung nach der Temperatur kann dabei hilfreich sein.

Bei Wohnungslüftungen ist zu beachten, dass bereits bei Luftwechseln von 0,5 /h im Winter Luftfeuchtigkeiten auftreten, die von den Bewohnern als deutlich zu trocken empfunden werden [z.B. Ebel et al. 2003].

### **Lüftungsregelung im Passivhaus**

Bereits zum Konzept des ersten Passivhauses gehörte eine Lüftungsregelung. Auch hier waren für die Wohnräume ursprünglich kostengünstige Mischgassensoren vorgesehen. Allerdings erwiesen sich diese als ungeeignet, einerseits wegen der Querempfindlichkeiten auf reduzierbare Gase, andererseits weil die Messwerte nicht reproduzierbar waren. Aus diesem Grunde wurde stattdessen ein Regelsystem entwickelt, das mit CO<sub>2</sub>-Sensoren in der Zuluft und Feuchtesensoren in der Abluft arbeitet [Feist et al, 1992]. Diese automatische Lüftungsregelung funktionierte und es wurden damit sehr niedrige Lüftungsraten bei gleichzeitig hoher Luftqualität erreicht [Feist, Grün et al., 1997-2]. Allerdings lagen die Kosten hoch und die Energieeinsparung war gering [Feist, 1994], so dass die CO<sub>2</sub>-Regelung zu dieser Zeit nicht weiter empfohlen wurde [Feist et al., 1997-1].

## 1.5.2 Lüftungsregelungen mit dem LuQaS-Sensor

### 1.5.2.1 Universität Essen

Im Rahmen des Projekts LuQaS II wurde an der Universität Essen ein Versuch einer Lüftungsregelung in einem Seminarraum durchgeführt (siehe Abbildung 1.4-8). Die Lüftung wurde anhand der Differenz zwischen dem Sensorsignal in Ab- und Zuluft geregelt.

$$\Delta L_{\text{Regel}} = LQ_{\text{Ab}} - LQ_{\text{Zu}} - \text{Offset}$$

Der Offset ist das Maß für die Grundbelastung des Raumes, die Differenz der Signalwert, der sich einstellt, wenn keine Personen im Raum sind. Abbildung 1.5-1 und Abbildung 1.5-2 zeigen Messergebnisse aus dem Seminarraum. Bei einem Anstieg der Differenz zwischen Abluft- und Zuluftkonzentration wird der Volumenstrom linear angehoben. Eine Bewertung des absoluten VOC-Pegels findet nicht statt.

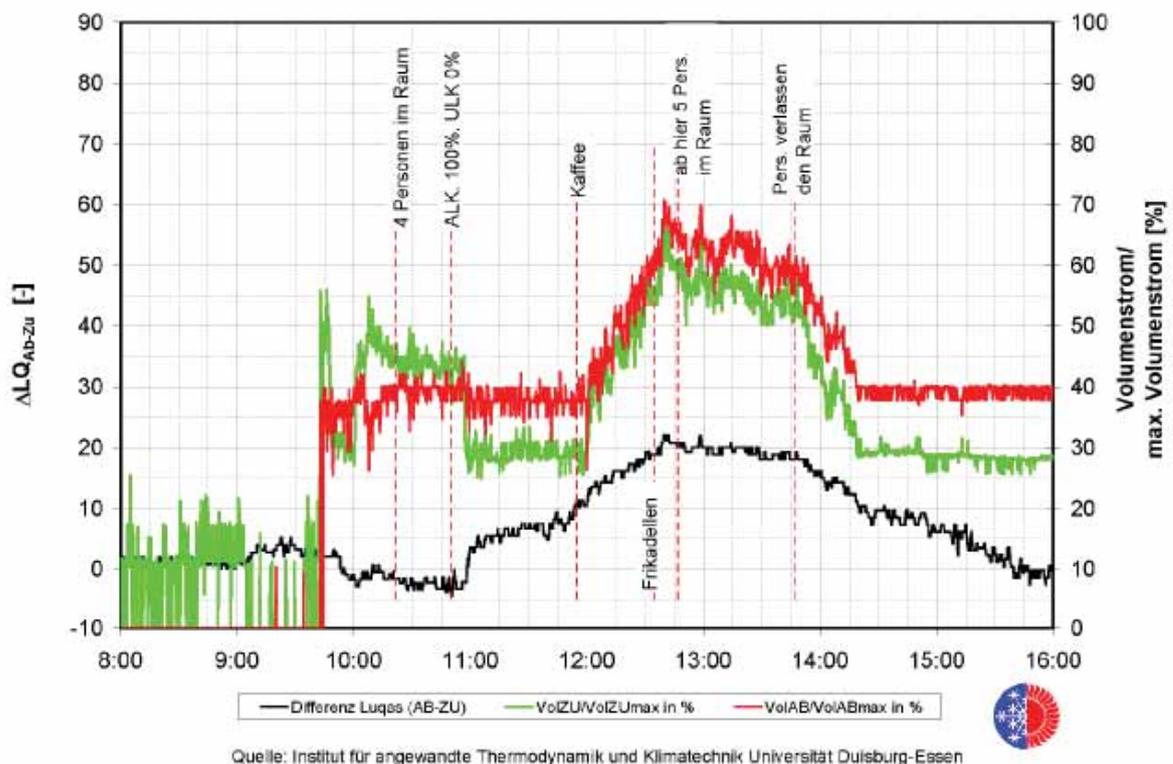
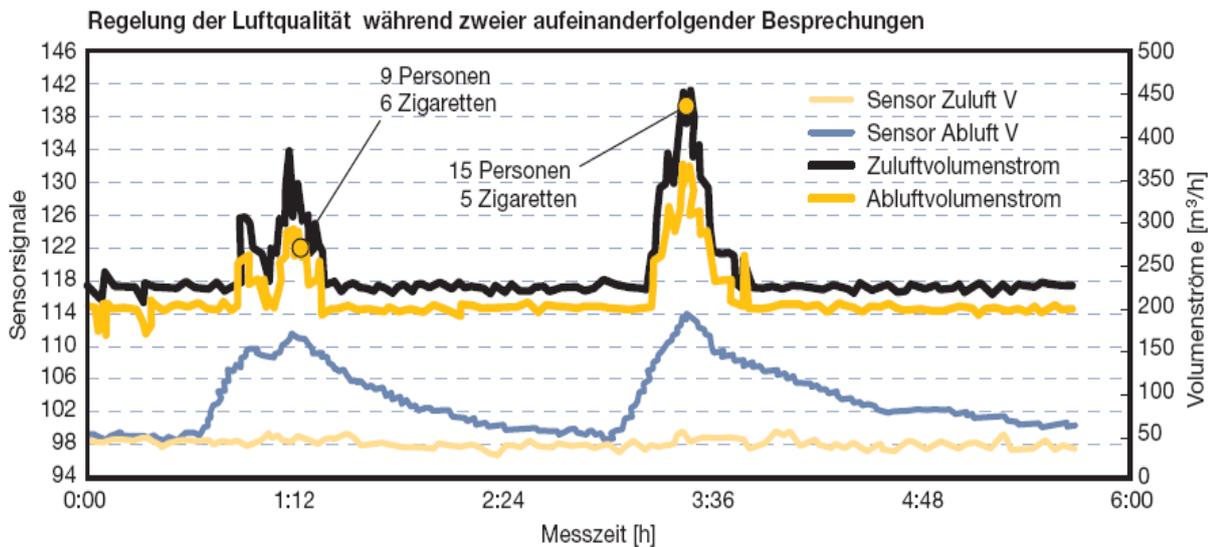


Abbildung 1.5-1: geregelt Volumenströme und Messergebnisse LuQaS während einer Veranstaltung im Seminarraum [Quelle: Presseerklärung der FGK]



**Abbildung 1.5-2: Regelung der Luftqualität im Seminarraum und Messergebnisse LuQaS während einer Veranstaltung im Seminarraum [BINE 2001]**

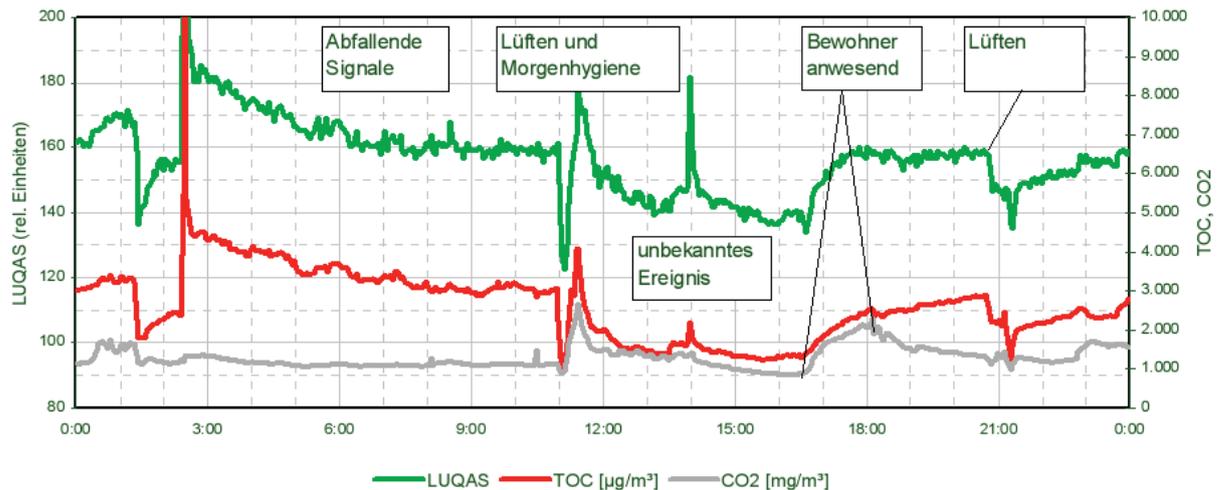
### 1.5.2.2 Regelungen mit der „Lüftungsampel“

Im Rahmen von „LuQaS II“ wurde eine Lüftungsampel für den Gebrauch durch den Nutzer entwickelt und eingesetzt (Abbildung 1.5-3). Sie besitzt zwei Skalen, eine für die Luftqualität auf Basis der LuQaS-Messwerte und eine für die Raumluftfeuchte.



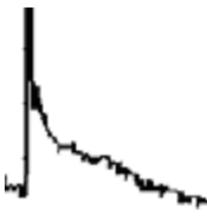
**Abbildung 1.5-3: Lüftungsampel [UTECH]**

Im Einsatz in mehreren Wohnungen wurde die Lüftungsampel als Regler verstanden, bei dem eine Reaktion durch den Nutzer (Fenster öffnen oder schließen) herbeigeführt wird. Geregelt werden sollte nach VOC und nach Feuchte. In Abhängigkeit von den Messwerten gibt die Lüftungsampel eine Empfehlung aus. Abbildung 1.5-4 zeigt die LuQaS-Messwerte, vergleichende TOC-Messungen mit dem photoakustischen Monitor sowie Kohlendioxid-Konzentrationen.



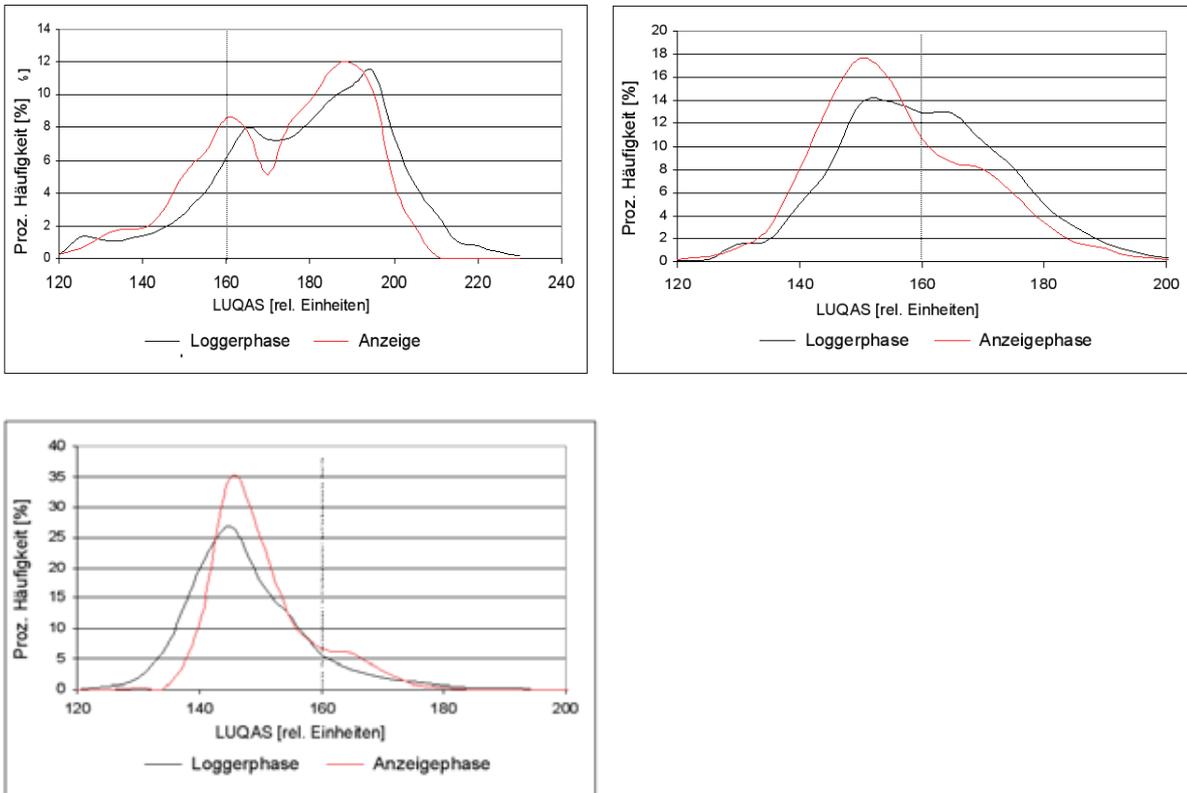
**Abbildung 1.5-4: Regelung mit LuQaS-Sensor und vergleichende Messung von TOC (photoakustischer Monitor) und CO<sub>2</sub> [Quelle: LuQaS II , Lüftungsampel]**

Aufgrund u. a. von Adsorptionsprozessen erwiesen sich momentane Messwerte als ungeeignet für eine Regelstrategie. Wichtiger für die Regelstrategie ist der zeitliche Verlauf. Für eine geeignete Strategie wurden Messreihen analysiert und typische Signalverläufe identifiziert.

A1	Kurzzeitige Spitze	Starke, aber kurze Emission Pegel sinkt durch Vermischung mit Raumluft oder Ablüften sehr schnell auf den Pegel vor dem Schadstoffeintrag  Beispiel: Abbildung 29 – ab ca. 13:30 Uhr	
A2	kontinuierlicher Anstieg	eher schwache, aber dauerhafte Emission; detektiert wird durchmischte Raumluft  Beispiel: Abbildung 29 - 21:00-1:00 Uhr	
A3	Starker Anstieg nach lokalem Minimum	tritt nach kurzen Lüftungsphasen auf Anstieg weist auf Ausgleichseffekte der Raumboberflächen hin  Beispiel: Abbildung 26 - ca. 7:00	
A4	Sprung, auf lokales Maximum, langsam abfallend	Messkurve verschiebt sich sprunghaft nach oben, häufiger Effekt Ursache unbekannt, vermutlich antropogen  Beispiel: Abbildung 28 - ab 5:30 Uhr	

**Abbildung 1.5-5: Regelung mit LuQaS-Sensor: Typische Signalverläufe und deren Ursachen [Quelle: LuQaS II , Lüftungsampel Teilbericht 2]**

In drei Wohnungen wurde ermittelt, inwieweit sich die Häufigkeiten der LuQaS-Messwerte nach Einsatz der Lüftungsampel verändert hatten (Abbildung 1.5-6). Eine allgemeine Aussage zu einer Veränderung der Luftqualität durch den Einsatz der Lüftungsampel konnte daraus aber nicht abgeleitet werden.



**Abbildung 1.5-6: Regelung mit LuQaS-Sensor: Messwerte ohne (Loggerphase) und mit (Anzeige) Lüftungsampel in einer Wohnung in einem Mehrfamilienhaus (oben links) bzw. in zwei Mehrfamilienhäusern (oben rechts und unten) [LuQaS II , Lüftungsampel]**

## 1.6 Einordnung des aktuellen Projekts im Umfeld der bisherigen Arbeiten

Im Rahmen des LUQAS II Projektes wurde gezeigt, dass LuQaS-Sensoren in Nicht-Wohngebäuden zur Überprüfung und Regelung der Luftqualität bzw. der Lüftungsanlage sinnvoll eingesetzt werden können. In Wohngebäuden wurde das Konzept der Lüftungssampel realisiert. Dabei wird aus den Messwerten eine Handlungsempfehlung an die Bewohner gegeben, um die Fensterlüftung an die VOC-Konzentration bzw. relative Feuchte anzupassen. Erfahrungen mit der Regelung von Wohnungslüftungsanlagen über den LuQaS liegen noch nicht vor. Dies ist Thema dieses Forschungsprojekt „Entwicklung energieeffizienter Komfortlüftungsanlagen ...“.

Aufgabenstellung dieses Projektes ist die Untersuchung von Einsatzmöglichkeiten des bestehenden LuQaS-Sensors zur sinnvollen Regelung des Luftvolumenstroms von Wohnungslüftungsanlagen. Analysen oder Weiterentwicklungen auf Sensorebene werden im Rahmen dieses Projektes nicht durchgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass der Sensor die in den beschriebenen LuQaS-Forschungsprojekten [Steimle 2003] und von ETR genannten Eigenschaften aufweist:

- geringe Querempfindlichkeit zur relativen Feuchte und Temperatur
- reproduzierbare Messwerte ohne nennenswerten Memory Effekt
- hohe Langzeitstabilität.

Die Detektierung von gesundheitsgefährdenden Stoffen in der Raumluft kann nur mit hohem messtechnischem Aufwand über z.B. Gaschromatografen/Massenspektrometer (GC/MS) erfolgen. Der Einsatz dieser Verfahren zur Lüftungsregelung ist nicht praktikabel. Entsprechend wird bei den folgenden Untersuchungen unterstellt, dass in der Raumluft keine gesundheitsgefährdenden Stoffe enthalten sind und der LuQaS-Sensor lediglich zur Verbesserung der Luftqualität und damit des Komforts eingesetzt wird.

Ziel dieses Projektes ist die Umsetzung der luftqualitätsgeführten Volumenstromregelung im Bereich der Wohnungslüftung. Wohngebäude zeichnen sich aus durch:

- Verunreinigungslasten auf einem insgesamt niedrigeren Niveau
- Geringe Veränderungsraten, große Zeitkonstanten.
- niedrige Luftwechselraten
- mehrere, kleine Räume, die aus Kostengründen normalerweise nicht einzeln erfasst und geregelt werden können.

Dabei ergeben sich verschiedene Fragestellungen, die im aktuellen Forschungsprojekt betrachtet und möglichst beantwortet werden sollen:

- Wie können die Sensoren platziert werden (Zu- und Abluft, Abluftauslässe, Führungsraum oder mehrere Räume?)
- Welche Regelstrategien sind geeignet: absolute Pegel, Differenz zur Außenluft?
- Wie kann ein geeigneter Sollwert gefunden werden?
- Wie hoch kann die Energieeinsparung bei Heizenergie und Ventilatorstrom ausfallen?
- Welche Komfortsteigerung sind möglich (Luftqualität, Feuchte, Raumtemperatur, abhängig von der Jahreszeit)?

## 2 Voruntersuchungen mit dem LUQAS-Sensor

Im Rahmen des Projekts zur Entwicklung einer energieeffizienten Komfortlüftung mit dem LuQaS-Sensor wurde eine Reihe von Testmessungen mit drei LuQaS-Sensoren vorgenommen, um das Verhalten der Fühler zu charakterisieren. Neben Einzelmessungen in Büroräumen mit starken Undichtigkeiten gegenüber der Außenluft wurden auch zwei Messkampagnen in einem Passivhaus und einer Passivhaus-Wohneinheit durchgeführt. Letztere besitzen eine hohe Luftdichtheit ( $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$ ) und mechanische Lüftung mit Zu- und Abluft und Wärmerückgewinnung. Diese Voruntersuchungen sollten dazu dienen, Informationen über den Signalhub und den Signalverlauf in Wohngebäuden mit mechanischen Lüftungsanlagen zu sammeln. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Messungen vorgestellt und die Konsequenzen für den Einsatz der LuQaS-Sensoren abgeleitet. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die LuQaS-Sensoren ein Messsignal zwischen 80 und 254 Digits liefern, ein Bezug auf eine bestimmte Konzentration eines Stoffes bzw. eine Umrechnung in ppm ist nicht möglich.

### 2.1 Messungen in einem Reihenendhaus in Passivhaus-Standard

#### 2.1.1 Objektbeschreibung

Vom 05.03.2007 bis 12.03.2007 wurde in einem Reihenendhaus in Passivhaus-Standard die Luftqualität mit drei LuQaS-Sensoren gemessen. Das Gebäude besitzt vier Zimmer in zwei Vollgeschossen und einem Staffelgeschoss mit insgesamt  $123 \text{ m}^2$  Energiebezugsfläche. Ein Jahr vor der Messung lag die Luftdichtigkeit bei  $n_{50} = 0,17 \text{ h}^{-1}$ , d. h. das Gebäude ist als sehr luftdicht zu bezeichnen. Das Gebäude verfügt über eine Lüftungsanlage mit mechanischer Zu- und Abluft, die in 8 Einzelschritten eingestellt werden kann. Nach Abschluss der VOC-Messungen wurden die Volumenströme der Lüftungsanlage für die verschiedenen Lüftungsstufen gemessen. Der letzte Filterwechsel lag zu diesem Zeitpunkt bereits 3 Monate zurück, so dass die ermittelten Volumenströme niedrigere Werte aufwiesen als bei der Einregulierungsmessung.

Aus Tabelle 2-1, die die gemessenen Volumenströme zeigt, ist ersichtlich, dass in Stufe 5 (Normallüftung) durch die Verschmutzung der Filter eine Reduktion des Zuluftvolumenstroms um ca. 4 % aufgetreten ist, Zu- und Abluft sind jedoch weiterhin ausbalanciert. Bei einer Verminderung der Lüftungsstufen sinkt der Luftaustausch und gleichzeitig tritt nach den vorliegenden Messergebnissen ein leichter Zuluftüberschuss auf, der jedoch im Bereich der Messunsicherheit der Volumenstrommessung liegt. In Stufe 3 erhält das Gebäude nur noch  $2/3$  des Auslegungsvolumenstromes.

**Tabelle 2-1: Soll- und Messwerte des Volumenstroms im untersuchten Gebäude**

Raum	Auslegungs- volumenstrom (mit neuen Filtern auf Stufe 5)	Messwert Stufe 5 Normallüftung	Messwert Stufe 4	Messwert Stufe 3
Zulufräume				
DG Süd	24	23	20	17
OG Süd	24	23	19	16
OG Schlafzimmer	39	30	26	20
EG Süd	24	25	21	17
EG Mitte	24	28	25	20
<b>Summe Zulufräume</b>	<b>135</b>	<b>129</b>	<b>111</b>	<b>90</b>
Anteil vom Auslegungswert	100 %	96 %	82 %	67 %
Ablufräume				
DG Technik	21	18	15	12
OG Bad	44	32	27,5	22,5
OG Schlafzimmer	15	18	14	10
EG Küche	40	46	33	28
EG WC	15	16	13	10
<b>Summe Abluft</b>	<b>135</b>	<b>130</b>	<b>102</b>	<b>82</b>
Anteil vom Auslegungswert	100 %	96 %	76 %	61 %

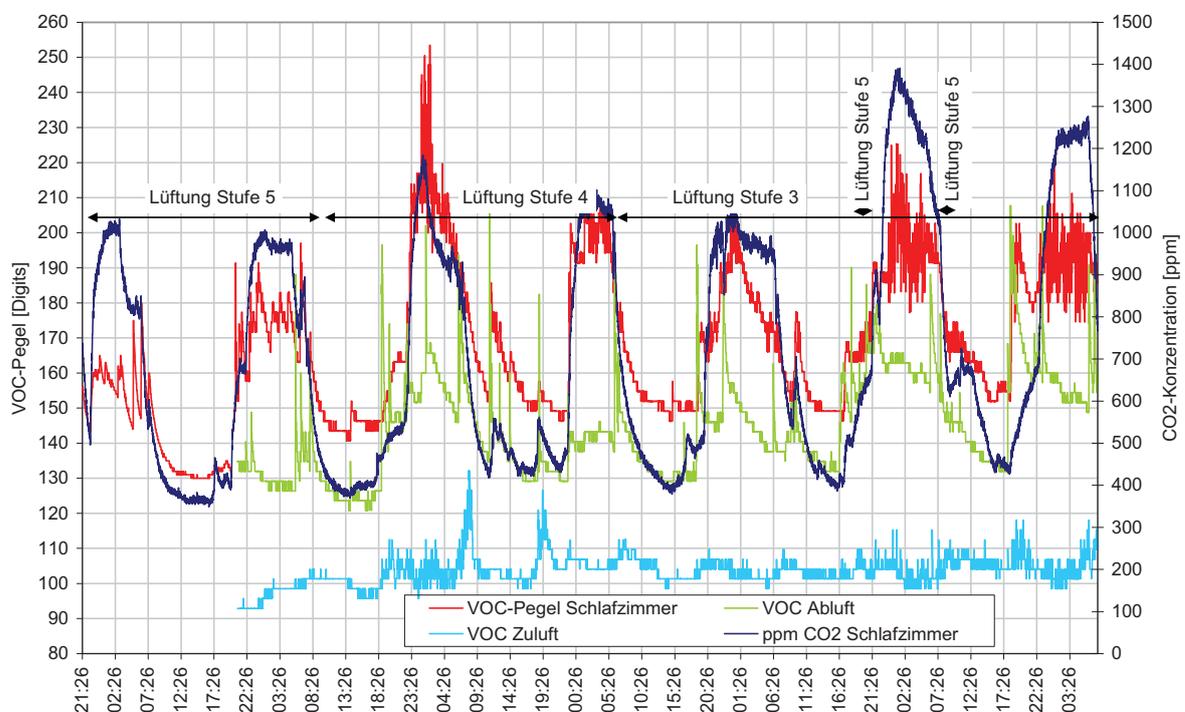
Die LuQaS-Sensoren wurden in der Lüftungsanlage (Zu- und Abluftstrang) sowie im Schlafzimmer platziert. Dadurch sollte überprüft werden, wie weit Belastungen in einem Raum auch in der Abluft noch messtechnisch erfasst werden können. Zusätzlich wurde im Schlafzimmer die CO<sub>2</sub>-Konzentration sowie Temperatur und Feuchte der Raumluft gemessen. Ein detailliertes Aktivitätsprotokoll erlaubt die Zuordnung von Ereignissen und Entwicklungen zur Tätigkeit der Bewohner. Die Messwerte im Schlafzimmer wurden bei nicht ganz verschlossener Schlafzimmertür ermittelt, wobei die Öffnung der Tür sich ggf. während der Nacht leicht ändern konnte.

In den folgenden Kapiteln werden die Messergebnisse detailliert beschrieben.

### 2.1.2 Verlauf der VOC-Konzentrationen

Abbildung 2.1-1 zeigt die VOC-Messungen zusammen mit den CO<sub>2</sub>-Konzentrationen während der Messperiode. Die Lüftungsanlage wurde in dieser Zeit in verschiedenen Stufen betrieben. Die ersten beiden Nächte erfolgte mit Normallüftung auf Stufe 5, danach zwei Nächte auf Stufe 4 und schließlich drei Nächte auf der Stufe 3. In der vorletzten Nacht wurde sowohl abends als auch morgens wegen intensivem Essensgeruch im Wohnbereich die Lüftungsanlage jeweils 2 Stunden auf Stufe 5 betrieben.

**Schlafzimmer:** Die VOC-Konzentration im Schlafzimmer lag in der ersten Nacht bei ca. 160 Digits und in der zweiten bei ca. 175 Digits (jeweils bei Normlüftung). Die Messwerte schwanken im Verlauf der Nacht - es gibt Phasen mit ansteigender und abfallender Konzentration. Die parallel dazu aufgetragene CO<sub>2</sub>-Konzentration steigt nachts auf maximal ca. 1000 ppm an und fällt im Laufe des Tages auf Werte unter 400 ppm, wenn sich niemand im Raum aufhält. Mit der CO<sub>2</sub>-Konzentration als Bewertungsbasis werden im Schlafzimmer an den ersten beiden Messtagen sowohl die Anforderungen der DIN 1946-6 bzw. DIN EN 13779 an die Luftqualitätsstufe IDA2 erfüllt als auch die Pettenkofergrenze mit 1000 ppm unterschritten – es herrscht somit eine gute Luftqualität. Die VOC-Messwerte unterscheiden sich deutlich und schwanken auch im Verlauf der Nacht stark. Der LuQaS-Sensor erfasst hier Stoffe der Raumluft, die nicht zwangsläufig durch CO<sub>2</sub> als Führungsgröße festgestellt werden. Tagsüber fällt die VOC-Konzentration von 160 bzw. 180 Digits auf ca. 130 Digits ab und schwankt dann kaum noch.



**Abbildung 2.1-1: VOC-Messung in einem Passivhaus über eine Woche**

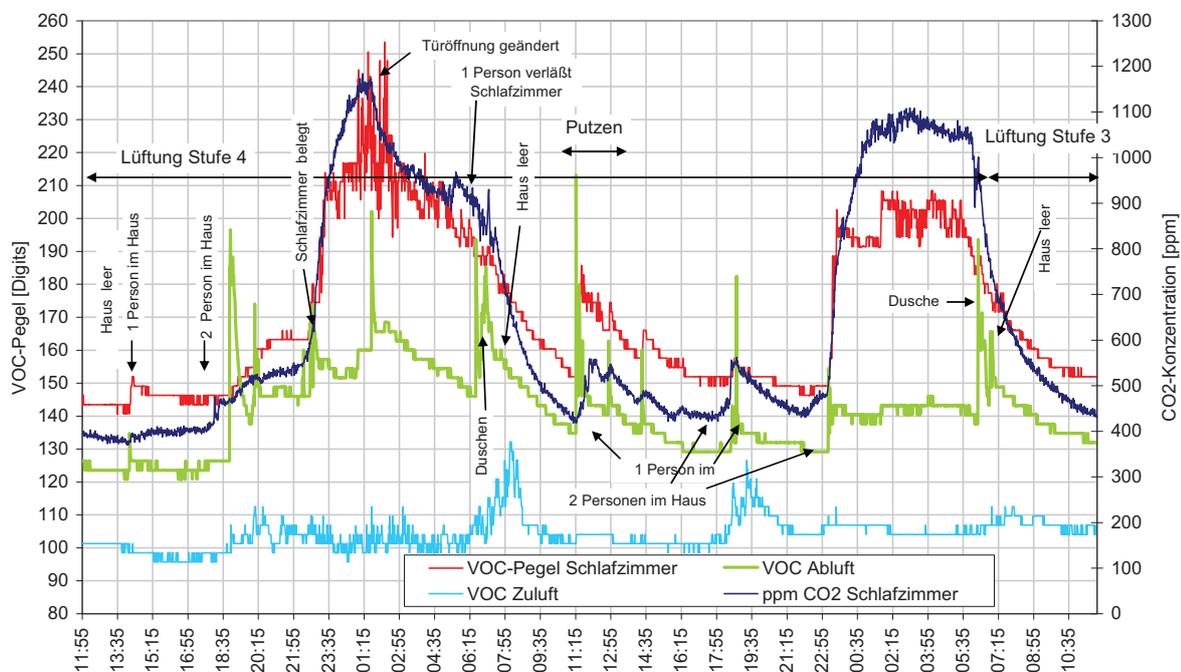
In den Nächten mit niedrigerer Lüftungsstufe liegen die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zwischen 1100 ppm und 1400 ppm und somit deutlich höher. Die VOC-Werte steigen ebenfalls an (bis zu 250 bei Spitzenwerten), aber ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Luftwechsel und VOC ist aber nicht erkennbar, da bei Stufe 3 teilweise niedrigere Werte bei gleicher Personenbelegung erreicht werden als in Stufe 4. Hier ist möglicherweise die individuelle humane VOC-Produktion an verschiedenen Tagen schwankend. Teilweise wurde die Luft im Schlafzimmer in den Morgenstunden dann als belastet empfunden.

**Zuluft:** Die VOC-Konzentrationen in der Zuluft liegen während der gesamten Messphase im Bereich zwischen 95 und 110 Digits, lediglich an einem Tag traten nennenswerte Spitzen bis

auf 132 Digits auf. Es ist somit bei diesen Messungen nicht mit nennenswerten Stoffeinträgen von außen zu rechnen. Eine VOC-Übertragung von der Ab- auf die Zuluft ist ebenfalls nicht festzustellen (im Gegensatz zu Abbildung 2.2-2 in Kapitel 2.2).

**Abluft:** Die VOC-Werte der Abluft liegen in Phasen ohne menschliche Anwesenheit im Gebäude im Bereich von 130 Digits. Während der Nacht mit Normallüftung ist nur eine kleine Erhöhung gegenüber Zeiten ohne menschliche Quellen feststellbar (ca. 5 Digits). Dieser geringe VOC-Hub muss bei der Festlegung der Einsatzgrenzen der Luftqualitätsregelung (siehe Kapitel 3) berücksichtigt werden. Bei reduzierter Lüftung ist nachts ein Anstieg von ca. 35 Digits im Mittel gegenüber Zeiten ohne Personenanwesenheit festzustellen.

Allerdings treten in der Abluft zusätzliche Ereignisse auf, da sie ein Gemisch aus dem gesamten Gebäude ist und besonders Emissionen in Ablufträumen wegen der hohen Luftwechselraten in Bad und Küche schnell zum Sensor transportiert werden.



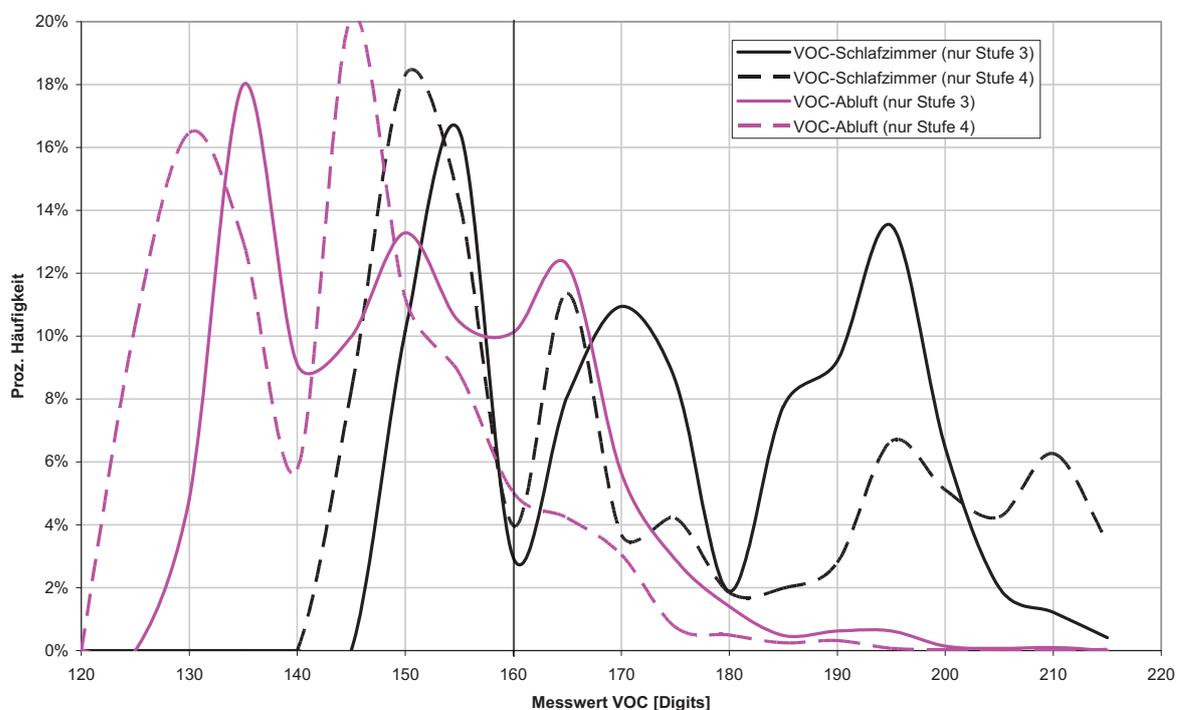
**Abbildung 2.1-2: Auszug über zwei Tage aus den VOC-Messung**

Abbildung 2.1-2 zeigt einen Auszug über zwei Tage aus der Messreihe und gleichzeitig die protokollierten Aktivitäten der Bewohner. Fast über den gesamten Zeitraum wurde die Lüftung auf Stufe 4 betrieben. Die Anwesenheit der Personen am Anfang des Diagrammausschnitts (links) führt nicht sofort zu einem Anstieg der VOC-Konzentrationen in der Abluft. Nach einem kurzen Peak beim Eintreffen der ersten Person ist keine Veränderung zu erkennen, bis plötzlich ein starker Peak die Werte der Abluft bis auf 195 Digits ansteigen lässt. Danach sinkt der Wert nicht mehr unter 140 Digits und es sind weitere kurzzeitige Ereignisse erkennbar (Aktivitäten der Bewohner in Küche und Bad), die den Pegel immer weiter anheben. Aber bereits während der Nacht sinkt der Abluftpegel ab, ohne dass sich die Anzahl der Bewohner verändert hat.

Am Morgen, wenn die Bewohner das Gebäude verlassen haben, klingen alle Messwerte ab, bis wieder Menschen durch Aktivitäten (hier Arbeiten mit Putzmitteln) nachweisbar sind. In dem hier dargestellten Ausschnitt erreichen die VOC- und CO<sub>2</sub>-Pegel aber keinen Gleichgewichtswert, da die Zeitspanne zu kurz ist (ca. 3,5 Stunden). Abhängig von der Lüftungsstufe wird dieser nach 3 bis 5 Stunden erreicht. Als Konsequenz lässt sich ableiten, dass die Lüftungsanlage in ihrem Volumenstrom erst reduziert werden sollte, wenn die VOC-Konzentrationen im Gebäude bereits abgeklungen sind.

### 2.1.3 Häufigkeitsverteilung der Messwerte

Um die VOC-Konzentrationen im Gebäude und die Nutzerprofile besser charakterisieren zu können, bietet es sich an, eine Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Messgrößen zu erstellen.



**Abbildung 2.1-3: Häufigkeitsverteilung der VOC-Messwerte für Abluft und Schlafzimmer bei verschiedenen Lüftungsstufen**

Abbildung 2.1-3 zeigt die Häufigkeitsverteilung für den Teil der Messwerte, die in den Lüftungsstufen 3 bzw. 4 aufgenommen wurden. Man erkennt, dass die Abluftkurve für Stufe 4 gegenüber Stufe 3 deutlich nach links zu niedrigeren Werten hin verschoben ist, d. h. die Häufigkeit geringerer VOC-Konzentrationen nimmt zu, die Luftqualität ist besser.

Ausgeprägte Peaks in der Verteilungskurve können auf bestimmte (Belastungs-)Situationen hindeuten. Bei den Abluftmesswerten ist bei beiden Lüftungsstufen ein Peak bei niedrigen VOC-Werten zu erkennen (Spitze bei 130 bzw. 135), der mit Zeiten ohne Personenanwesenheit zusammenhängt. Der zweite Peak repräsentiert die Zeiten mit zwei Personen im Gebäu-

de, wobei die Lüftungsstufe 3 einen breiten Bereich aufweist (mit Gipfeln bei 150 und 165 Digits), die Stufe 4 aber einen ausgeprägten Peak bei ca. 145 Digits. Also auch hier kann von besserer Luftqualität ausgegangen werden.

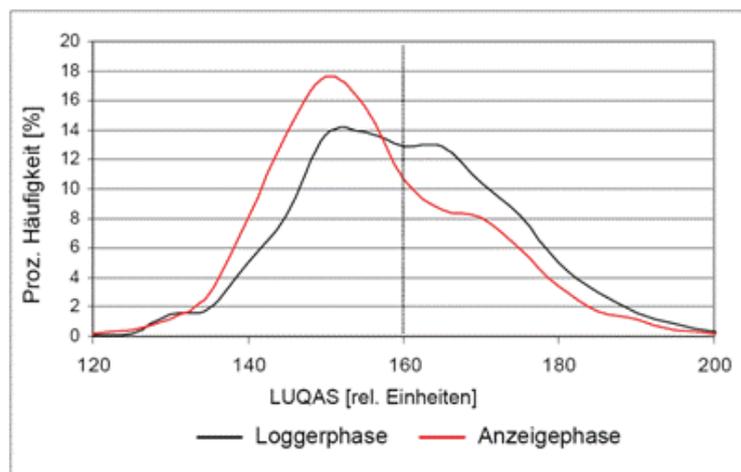
Bei den Messwerten für das Schlafzimmer bei Lüftungsstufe 3 sind sehr ausgeprägte Peaks zu erkennen. Diese repräsentieren die Zeiten der Abwesenheit von Personen sowie die einzelnen Nächte, die sehr unterschiedliche VOC-Pegel ergaben. Bei Lüftungsstufe 4 sind die Peaks ca. 5 Digits zu niedrigeren Werten verschoben bzw. die Gipfel sind flacher. Beim Schlafzimmer wirkt sich die Reduktion des Volumenstromes bei voller Personenbelegung am deutlichsten aus. Der hier dargestellte Zustand mit abgesenktem Volumenstrom in der Nacht sollte bei der Komfortlüftung nicht auftreten.

Für die Lüftungsstufe 5 verschiebt sich die Verteilung stark nach links zu besserer Luftqualität, jedoch ist die vorhandene Anzahl an Messwerten für die Abluft hier deutlich geringer, so dass eine statistisch belastbare Aussage schwierig ist. Die Mittelwerte für Tag und Nacht sind in der folgenden Tabelle 2-2 für alle drei Lüftungsstufen dargestellt.

**Tabelle 2-2: VOC- und CO<sub>2</sub>- Mittelwerte nach Tageszeit differenziert**

	Lüftung Stufe 5		Lüftung Stufe 4		Lüftung Stufe 3	
	Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht
VOC Schlafzimmer	132	166	154	205	156	191
CO <sub>2</sub> -Schlafzimmer	375	943	438	1029	496	1159
VOC Zuluft		97	101	103	104	102
VOC Abluft		129	133	150	136	154

Bereits in vorangehenden Forschungsprojekten wurden für Altbauten mit geringer Luftdichtheit und ohne Lüftungsanlage solche Verteilungen erstellt. Zur Einordnung der gezeigten Verteilung ist in Abbildung 2.1-4 aus [Bremer Umweltinstitut, 2004, S. 62] die gemessene Häufigkeitsverteilung aus einem Einfamilienhaus Baujahr 1961, in dem zwei berufstätige Erwachsene und zwei Kinder wohnen, dargestellt. Die mit Loggerphase gekennzeichnete Kurve gibt die Messwerte aus dem Wohnraum ohne Rückmeldung an die Bewohner wieder, bei der Kurve Anzeigephase wurden die Bewohner über optimales Lüftungsverhalten mit einer Lüftungsampel informiert. Im Vergleich zu dem Passivhaus sind keine ausgeprägten Höcker zu erkennen. Mögliche Gründe können hier andere Anwesenheitsprofile oder ein verändertes Abklingverhalten durch Fugenlüftung sein. Der Schwerpunkt der gemessenen Werte liegt bei ca. 160 Digits in der Loggerphase und bei ca. 150 Digits in der Anzeigephase. Der



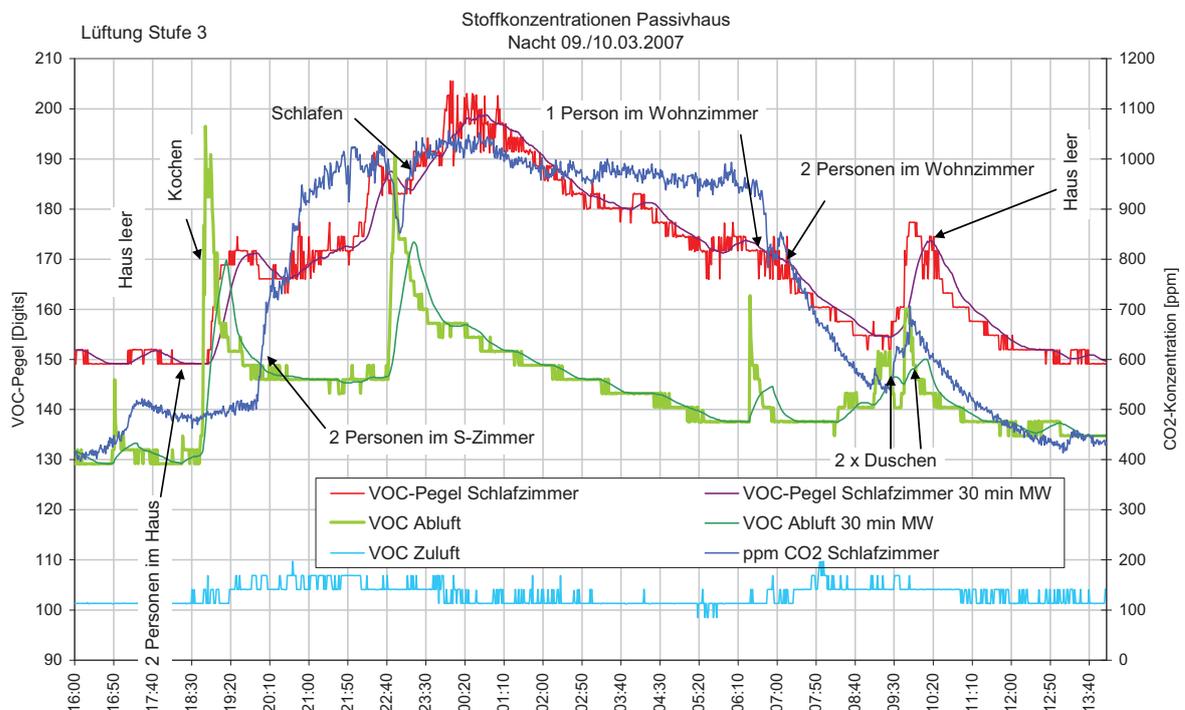
**Abbildung 2.1-4: Verteilung aus Bremer Umweltinstitut (2004), LUQAS II-Projekt: EFH, BJ 1961, 2 berufstätige Erwachsene, 2 Kinder**

direkte Vergleich zum Passivhaus ist schwierig, da hier im Schlafzimmer und in der Abluft gemessen wurde, außerdem sind in der Abbildung 2.1-3 nur Werte mit reduzierter Lüftung dargestellt. Bei Normallüftung liegt im Passivhaus die Verteilung bei niedrigen VOC-Konzentrationen.

Dennoch wurde die Auswertung hier dokumentiert, da über eine solche Häufigkeitsverteilung ggf. Schwellwerte der Luftqualitätsregelung abgeleitet werden könnten. In der Messphase mit den vier Prototypenhäusern wird dieser Ansatz erprobt und überprüft werden, ob er Erfolg versprechend ist.

### 2.1.4 Glättung der Messwerte

Einzelne Emissionen in Ablufträumen führen zu kurzen Peaks in den Messwerten, die bei der Verarbeitung der Information für die Luftqualitätsregelung zu Schwierigkeiten führen können, da der Regler ggf. sprunghaft reagiert. Aus diesem Grund wurden aus den 1-Minutenwerten gleitende 30-Minuten-Mittelwerte berechnet und im Vergleich zu den nicht gemittelten Messwerten dargestellt (Abbildung 2.1-5). Durch das gleitende Mittel werden Peaks abgeschwächt, Tendenzen wie das Abklingen der VOC-Konzentration aber nicht verwischt. Bei Peaks tritt eine gewisse Verzögerung im Anstieg auf, eine nennenswerte Zeitverzögerung ist aber nicht vorhanden. Durch einen Vergleich der 1-Minuten- und der gleitenden 30-Minuten-Mittelwerte könnte der Messwerteverlauf dadurch weiter geglättet werden, dass kurze Spitzen, die beim leicht verzögerten Anstieg des Mittelwertes bereits wieder abgeklungen sind nicht mehr (so stark) in die Mittelwertbildung einbezogen werden.



**Abbildung 2.1-5: Auszug über eine Nacht aus den VOC-Messung mit gleitenden Mittelwerten**

### 2.1.5 Ermittlung von Quellstärken der Stofflast

Da Anwesenheit und Aktivitäten von Personen im Gebäude zu einer Erhöhung der VOC-Konzentration führen, muss von diesen eine aktivitätsabhängige Emission ausgehen. Die Höhe dieses Emissionsstroms wird im Weiteren als Quellstärke bezeichnet. Sie kann aus Zu- und Abluftkonzentration, dem Volumenstrom der Lüftungsanlage (Undichtigkeiten in der Gebäudehülle werden hier vereinfachend nicht berücksichtigt, da von einem Einsatz in sehr luftdichten Gebäuden ausgegangen wird), dem Gebäudevolumen sowie der Veränderung der Konzentration im Gebäude berechnet werden. Wird ein ideal durchmischtes Gebäudevolumen unterstellt, kann die mittlere Gebäudekonzentration gleich der Abluftkonzentration angenommen werden. Für diesen Fall berechnet sich die Quellstärke wie folgt (Gl. 2-1).

$$\text{Gl. 2-1} \quad \dot{V}_Q = V'_{Geb} * \left( \frac{C_{Abluft,2} - C_{Abluft,1}}{t_2 - t_1} \right) + \dot{V}_{Anlage} * (C_{Abluft} - C_{Zuluft})$$

mit

$$\dot{V}_Q = \text{Quellstärke [g/h]}$$

$$V'_{Geb} = \text{anzusetzendes Gebäudevolumen [m}^3\text{]}$$

$$\dot{V}_{Anlage} = \text{Volumenstrom der Lüftungsanlage [m}^3\text{/h]}$$

$$C_{Abluft}, C_{Zuluft} = \text{VOC-Konzentrationen in Zu- und Abluft [g/m}^3\text{]}$$

Um aus den LuQaS-Messwerten – im Weiteren als LuQaS-Digits bezeichnet – eine Quellstärke der Verunreinigungen zu berechnen, sind mehrere Modifikationen der Messwerte erforderlich.

#### Linearisieren der LuQaS-Kennlinie

Die LuQaS-Digits stehen in einem nichtlinearen Zusammenhang zur Stoffkonzentration. Dieser Zusammenhang muss für die Berechnung der Quellstärke linearisiert werden. Problematisch ist dabei, dass sich die LuQaS-Kennlinie für verschiedene Stoffe unterschiedlich darstellt (siehe Abbildung 1.4-7). Vereinfacht wird für die Linearisierung die Kennlinie für die CO-Konzentration verwendet. Diese Kennlinie wird auch zur Kalibrierung des LuQaS herangezogen. Die Linearisierung erfolgt über folgende Gleichung (Gl. 2-2):

$$\text{Gl. 2-2} \quad C_{Lin} = \left( \frac{C_{Digits}}{41,4} \right)^{2,34} * 100$$

Der Faktor 100 bewirkt, dass die Konzentration C und die LuQaS-Digits beim Zahlenwert 200 weitgehend übereinstimmen.

#### Berücksichtigen der gerichteten Gebäudedurchströmung

Das Modell des ideal durchmischten Gebäudes ist für die bei energieeffizienten Gebäuden (z. B. Passivhäusern) übliche gerichtete Gebäudedurchströmung nicht zutreffend. So wird die Zuluft den Aufenthaltsräumen zugeführt. Von dort strömt sie durch die Übergangszone (Flu-

re, Treppenhaus) in die Ablufträume und wird dort abgesaugt. Aufgrund dieser „Mehrfachnutzung“ der Luft, muss berücksichtigt werden, in welcher Zone die Verunreinigungen auftreten. Hierdurch wird das Verhältnis

**Gl. 2-3**  $f_G = \text{mittlere Konzentrationsdifferenz} / \text{maximale Konzentrationsdifferenz}$   
 $= (C_{\text{Geb}} - C_{\text{außen}}) / (C_{\text{Abluft}} - C_{\text{außen}})$

bestimmt.  $f_G$  kann auch als der Anteil des Gebäudevolumens interpretiert werden, der in Gl. 2-1 einzusetzen ist. Zur Abschätzung von  $f_G$  werden typische Anteile von Zu-, Überström- und Abluftzone am gesamten Gebäudevolumen angenommen.

Zuluftzone	2/3 des Gebäudevolumens
Überströmzone	1/6 des Gebäudevolumens
Abluftzone	1/6 des Gebäudevolumens

Weiter wird eine für alle Zonen konstante spezifische Quellstärke angenommen. Damit kann  $f_G$  für folgende Fälle abgeschätzt werden (Tabelle 2-3).

**Tabelle 2-3: Quantifizierung von  $f_G$  zur Berücksichtigung der gerichteten Gebäudedurchströmung**

Variante	Verunreinigung in folgenden Zonen	$f_G$
Gesamt	Zu- Überström- und Abluftzone	75 %
Zuluft	Zuluftzone	100 %
Abluft	Abluftzone	17 %
Ergänzend		
Direktabsaugung	Ablufträume mit Anteil Direktabsaugung	5 %

Die Zuweisung des jeweiligen Faktors geschieht über den Gradienten der Abluftkonzentration. Ein steiler Gradient deutet darauf hin, dass die Verunreinigung in einem Abluftraum gegebenenfalls sogar mit einem Anteil Direktabsaugung auftreten.

Für die Zuweisung von  $f_G$  wird zwischen den beiden Fällen unterschieden:

- Sinkende Abluftkonzentration                      negativer Gradient
- Ansteigende Abluftkonzentration                positiver Gradient

Ein absinken der Abluftkonzentration kann bei Vernachlässigung von Sorptionsprozessen und Fenster- und Fugenlüftung nur durch die Abfuhr der Verunreinigungen durch die Lüftungsanlage hervorgerufen werden. Der maximale Gradient ist damit durch das Gebäudevolumen und den Volumenstrom physikalisch begrenzt. Diese Grenze wird berechnet, wobei eine typische Konzentrationsdifferenz zur Außenluft und eine Quellstärke von Null angenommen werden. Wird dieser Grenzgradient unterschritten (negative Werte) wird eine Verunreinigung in der

Abluftzone angenommen. Unterschreitet der Gradient den für eine Verunreinigung in einem Abluftstrom minimal möglichen Wert, wird von einem Anteil Direktabsaugung ausgegangen.

Die Gradienten bei einem Anstieg der Abluftkonzentration sind nicht durch den geförderten Luftvolumenstrom und das Gebäudevolumen begrenzt. Sie ergeben sich aus der Höhe der Quellstärke. Diese kann für die Zuweisung von  $f_G$  nicht verwendet werden, da sie erst berechnet werden soll. Entsprechend wird vereinfacht angenommen, dass die Grenzen für die Zuweisung von  $f_G$  dem Doppelten der Absolutwerte der Gradienten bei sinkender Konzentration entsprechen.

### **Ausreißer**

In den Messwerten treten vereinzelt starke Sprünge bei einzelnen LuQaS- Messwerten auf. Hieraus berechnen sich extreme Werte der Quellstärke. Um diese zu eliminieren werden Ausreißer, die außerhalb der 1 % und 99% - Quantile liegen, auf die Werte der entsprechenden Grenzen begrenzt.

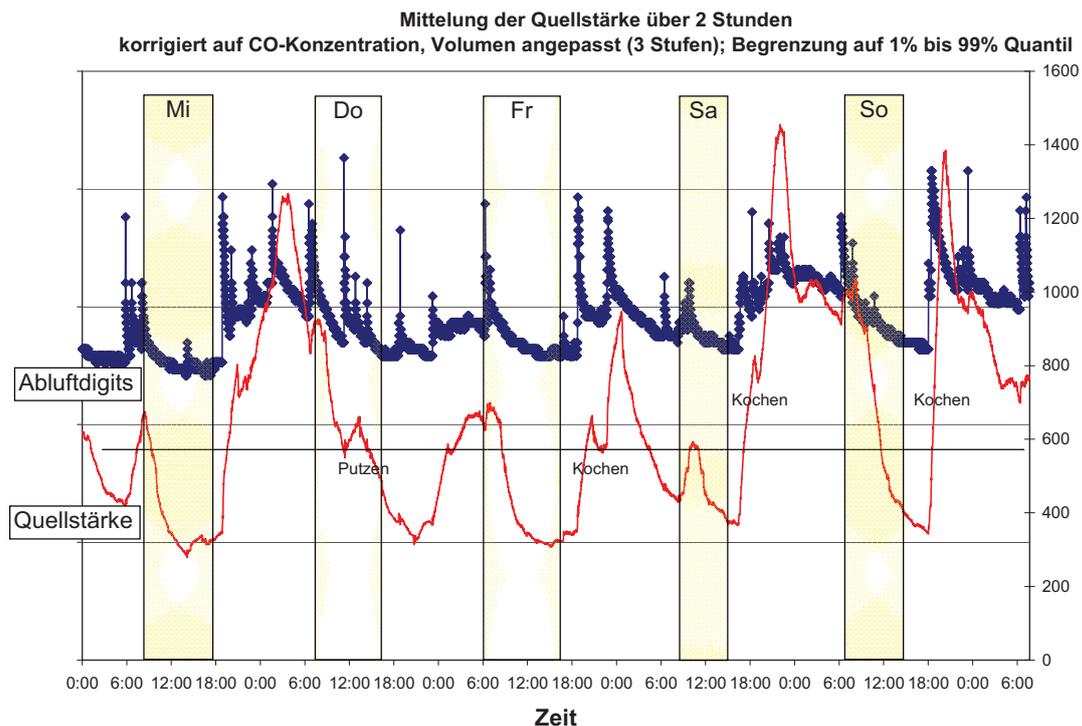
### **Mittelungszeitraum**

Auch die so modifizierten Werte der Quellstärke haben noch eine zu hohe Schwankungsbreite, um sinnvoll ausgewertet werden zu können. Die Gründe hierfür sind nicht im Einzelnen bekannt. Sie können u. a. auf folgende Punkte zurückgeführt werden:

- Unzulänglichkeiten bei der Zuweisung bei  $f_G$
- Änderung der Gebäudedurchströmung aufgrund von z. B. geöffneten Innentüren
- Unterschiedliche Empfindlichkeit von LuQaS auf unterschiedliche Stoffe.

Da die Fehler sowohl bei dem Anstieg als auch beim Abfall der LuQaS-Digits auftreten können, werden ihre Auswirkungen durch eine Mittelwertbildung gedämpft. Die Auswertung der durchgeführten Kurzzeitmessungen legt einen Mittelungszeitraum für die Quellstärke von 1 bis 4 Stunden nahe.

Abbildung 2.1-6 zeigt den Verlauf der Abluftkonzentration sowie der Quellstärke unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Anpassung sowie einer Mittelungszeit von 2 Stunden. Die gelben Balken markieren Zeiten, in denen keine oder nur eine Person im Gebäude anwesend ist. Die Abwesenheitszeiten treten während des Tages auf. Die Wochentage sind in den gelben Balken eingetragen.



**Abbildung 2.1-6: Darstellung der Abluftkonzentration und gemittelten Quellstärke**

Die Entwicklung der Quellstärke in dieser Woche hat einen weitgehend plausiblen Verlauf. In den Abwesenheitszeiten (gelbe Flächen) sinkt die Quellstärke deutlich. Sind Personen anwesend, zeigt sich in der Regel eine deutliche Zunahme der Quellstärke. Diese scheinen jedoch nur in untergeordneter Weise von den Verunreinigungen durch die Personen selbst, sondern mehr durch deren Aktivitäten hervorgerufen zu werden. So gibt es Zeiten, in denen zwei Personen anwesend sind, die Quellstärke aber nur wenig ansteigt bzw. konstant bleibt. Erst wenn z. B. gekocht wird, ergibt sich ein deutlicher Anstieg der Quellstärke.

Die Tagesmaxima der Quellstärke fallen in dem betrachteten Zeitraum unterschiedlich aus. Insbesondere ist dies in der Zeit von Donnerstag auf Freitag festzustellen. Eine Erklärung hierfür kann derzeit nicht gegeben werden. Es kann aber natürlich auf unterschiedliche Nutzungen zurückgeführt werden.

Die Minima liegen in einem vergleichbaren Bereich. Dies ist für die Umsetzung einer entsprechenden Regelungsstrategie ein wichtiges Ergebnis, da es auf das Vorhandensein eines weitgehend einheitlichen Grundpegels der Quellstärke hindeutet, auf die sich die durch die Nutzung bedingte Quellstärke aufmoduliert. Ebenfalls positiv zu bewerten ist, dass die aus den modifizierten Messwerten ermittelte Quellstärke weitgehend unabhängig vom Volumenstrom der Lüftungsanlage ist und somit dem theoretischen Verlauf nahe kommen. In dem betrachteten Zeitintervall wurden unterschiedliche Volumenströme der Lüftungsanlage eingestellt, was zu einem Anstieg der Messwerte in der Abluft führt.

Mit Hilfe der auf diese Weise ermittelten Quellstärke der Verunreinigungen könnte eine Regelstrategie für den Volumenstrom abgeleitet werden. Dabei wird der Volumenstrom reduziert, wenn die Quellstärken auf eine Abwesenheit der Personen schließen lassen. Um weitere

Erfahrungen über die Höhe und den Verlauf der Grundpegels und des „Human“-Pegels der Quellstärken zu sammeln, sind jedoch zunächst weitere Erfahrungen aus den Musterhäusern der Messphase erforderlich.

## 2.2 Messungen in einer Passivhaus-Wohneinheit

Im Zeitraum vom 20.04.2007 bis zum 27.04.2007 wurde in einer Passivhaus-Wohneinheit die Luftqualität mit den gleichen drei LuQaS-Sensoren in Abluft, Zuluft und Wohnraum erfasst (Abbildung 2.2-1). Die Wohneinheit ist als Maisonett-Wohnung mit Küche, Schlafzimmer, Wohnraum, Bad und Technikraum errichtet, besitzt eine Wohnfläche von ca. 90 m<sup>2</sup> und ein Luftvolumen von 238 m<sup>3</sup>. Die Lüftungsanlage wurde während der Messphase überwiegend in kleinster Lüftungsstufe betrieben. Zusätzlich wurde jedoch auch über die Fenster gelüftet, im Schlafzimmer war nachts, wenn dort zwei Personen schlafen, immer das Fenster gekippt. Im Wohnraum übernachtete ebenfalls regelmäßig eine Person.

Durch ein Aktivitätsprotokoll wurden die wichtigsten Ereignisse in der Wohnung aufgezeichnet. Die Wohnung war häufiger belegt als bei der Messungen im Reihenhendhaus. Im Wohnraum befindet sich ein Aquarium, bei dem in der Zeit von 9:00 - 12:00 und 15:00 - 21:00 Uhr die Beleuchtung eingeschaltet ist. Zusammen mit der Beleuchtung wird ein Teil des Wassers des Aquariums an einer Kohlelektrode zur Enthärtung elektrolytisch in Wasserstoff und Sauerstoff verlegt. Der Sauerstoff wird an der Kohle zu CO<sub>2</sub> umgewandelt. Als Reststoff wird Wasserstoff (H<sub>2</sub>) in die Raumluft abgegeben. Diese Information ist bei der Auswertung der Messdaten von Bedeutung.

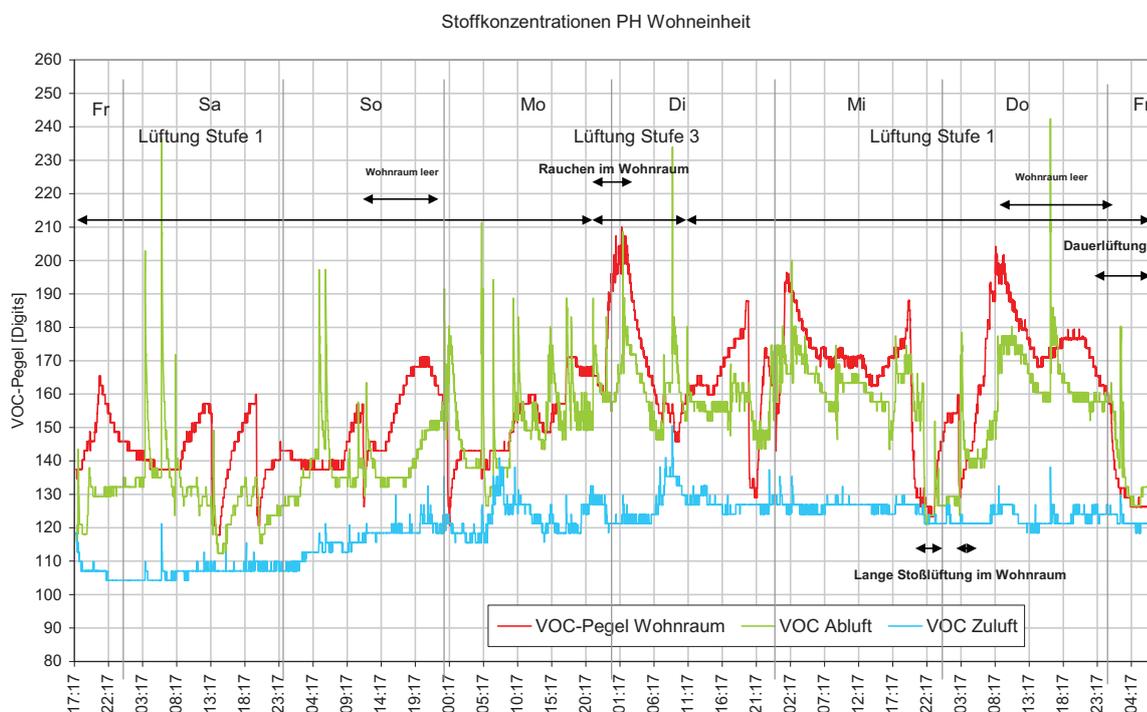
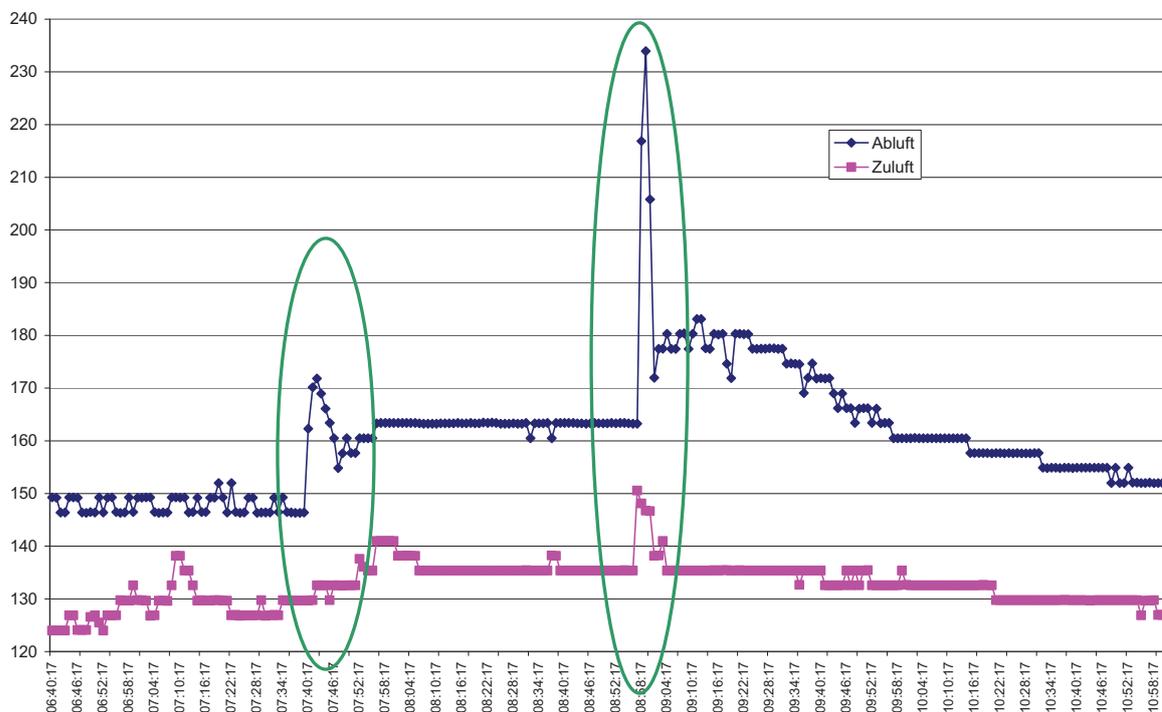


Abbildung 2.2-1: VOC-Messung in einer Passivhaus-Wohneinheit über eine Woche

**Zuluft:** Im Gegensatz zur Messung im März im Reihenendhaus ist bei der Zuluft im Laufe der Messwoche ein Anstieg der VOC-Konzentration in der Zuluft festzustellen. Die Auswertung der Winddaten für die Messstation Darmstadt [www.hlug.de] ergab keine Hinweise, dass aufgrund der Lage der Frischluftansaugung zu einem Hof hin, eine Veränderung der Windrichtung zu diesem Anstieg geführt haben könnte. Der Verlauf der Außenluftkonzentration folgt bei sonnigem Wetter und ab 22.04. bei ansteigenden Tagesmitteltemperaturen in etwa der Außentemperatur. Inwieweit die VOC-Konzentration der Außenluft jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt, wird während der Messphase mit den Prototypen der Lüftungsanlagen mit Luftqualitätsregelung überprüft werden.

Da bei einzelnen Konzentrationsspitzen in der Zuluft das zeitliche Übereinstimmen mit Spitzen in der Abluft auffällt, wurde zusätzlich untersucht, ob hier eine Übertragung von Stoffen innerhalb des Lüftungsgerätes oder durch äußere Kurzschlussströmungen (Außen- und Fortluftdurchbrüche liegen auf der gleichen Gebäudeseite auf gleicher Höhe in ca. 2 m Abstand) entstehen. In Abbildung 2.2-2 ist für einen Morgen der Verlauf von Zu- und Abluft aufgetragen. Man erkennt die gute Übereinstimmung der Peaks beider Messwerte. Allerdings sind solche parallelen Verläufe nicht immer zu erkennen, sondern nur bei einigen besonders hohen VOC-Konzentrationen der Abluft. Dies lässt darauf schließen, dass es sich um Kurzschlussströmungen außerhalb des Gebäudes handelt (die Abluft wird scheinbar teilweise als Zuluft angesaugt), da bei Stoffübertragungen innerhalb des Lüftungsgerätes zu erwarten ist, dass alle Abluftspitzen auch in der Zuluft zu erkennen sind.



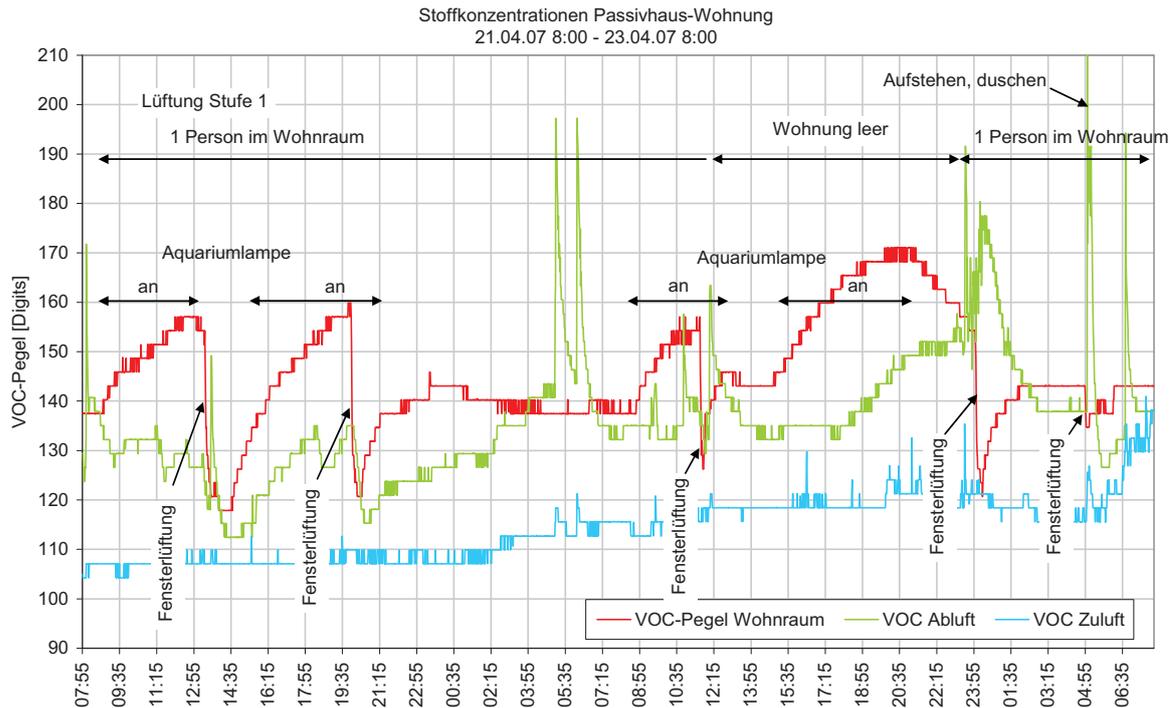
**Abbildung 2.2-2: Verlauf der Zu- und Abluftkonzentration am 24.04.07**

Abluft: Bei geschlossenen Fenstern ist ein allmählicher Anstieg des Mittelwertes bzw. Grundpegels der Abluftkonzentration zu beobachten (Abbildung 2.2-1). Dies liegt wahrscheinlich daran, dass die Lüftungsanlage in der niedrigsten Stufe betrieben wurde und es so zu einer Akkumulation von VOC in der Wohnung kam. Zusammen mit dem Anstieg des VOC-Pegels in der Zuluft konnte in Zeiten ohne Belegung die Konzentration nicht auf niedrige Werte reduziert werden.

Auffällig ist, dass sowohl bei der Abluft als auch beim Wohnraum die Konzentration im Laufe der Nacht bereits abnahm, was so bei dem Vergleichshaus nicht gemessen wurde. Gleichzeitig wurde auch dann ein Anstieg der VOC-Konzentration gemessen, wenn die Wohnung leer war. Hier ist es wahrscheinlich, dass die Quelle dieser Messwerte das Aquarium ist. Entweder durch Algenaktivitäten bei Tag oder die Wasserstoffproduktion steigt die Messwerte exakt während der Betriebszeiten der Aquariumbeleuchtung an (Abbildung 2.2-3). Nachts sinkt die Konzentration ab, so dass trotz der anwesenden Person ein niedrigerer Pegel erreicht wird (in den ersten drei Tagen ca. 140 Digits). Hier ist von einer stark unterschiedlichen Sensitivität des LuQaS-Sensors für dieses Gas und (Human-)VOC anzunehmen.

Die Pegel in der Abluft lagen zwischen ca. 115 Digits (nahe Außenluft) nach kräftigem Lüften und ca. 175 Digits an einem Nachmittag. Zusätzlich traten häufiger kurze Spitzen bis zu 240 Digits auf. Der Grundpegel lag an den letzten Messtagen bei ca. 155 Digits.

Wohnraum: Im Wohnraum treten, bedingt durch die zeitlich unterschiedlichen Anwesenheiten von Personen keine deutlichen bzw. regelmäßigen Profile auf. Die Konzentrationen steigen bis über 200 Digits an einem Abend mit Rauchern in der Wohnung und bis über 190 Digits an anderen Tagen – auch außerhalb der Nacht. Auffällig ist ein Anstieg von 145 bis auf 170 Digits an einem Nachmittag, an dem sich niemand in der Wohnung aufhielt (siehe Abluft). In dieser Wohnung liegt der Pegel im Wohnraum ca. 25 Digits über der Abluft. Die einzelnen Fensteröffnungsereignisse in den Messwerten können gut mit dem Aktivitätsprotokoll korreliert werden.



**Abbildung 2.2-3: VOC-Messung in einer Passivhaus-Wohneinheit über zwei Tage**

Aufgrund fehlender Messwerte für den Luftwechsel in der verwendeten Lüftungsstufe 1 (Normalstellung Stufe 4), kann aus den Messwerten keine Quellstärke für die Belastungen berechnet werden.

Die Bildung von gleitenden Mittelwerten der VOC-Konzentration glättet die Spitzen deutlich (hier nicht dargestellt) und scheint gut für den Einsatz in einer Luftqualitätsregelung geeignet zu sein.

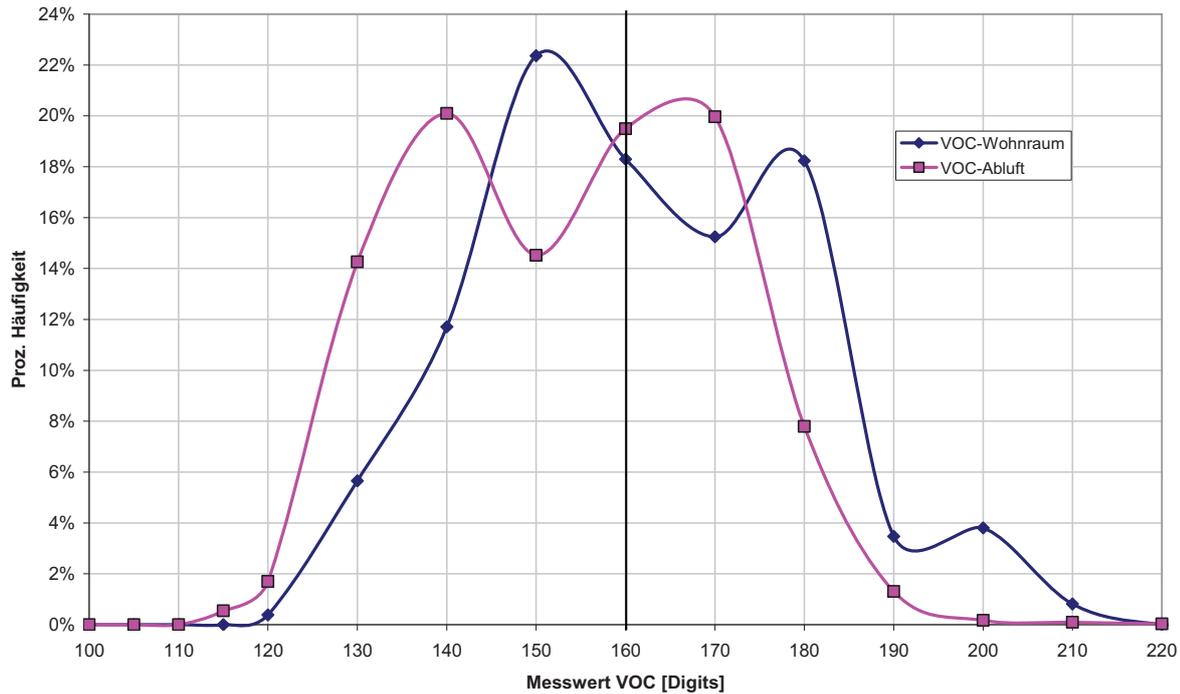
Häufigkeitsverteilung der Messwerte:

Eine Unterteilung der Messwerte in die Tages- und Nachtmittelwerte bringt in dieser Wohneinheit keine eindeutigen Ergebnisse (siehe folgende Tabelle 2-4). Im Wohnraum und in der Abluft treten vergleichbar hohe VOC-Konzentrationen auf, die sich in ihrem Mittelwert nicht zwischen Tag und Nacht unterscheiden. Stufe 3 der Lüftungsanlage wurde nur während drei Stunden mit Zigarettenrauch betrieben, so dass der hohe Wert im Wohnraum plausibel ist.

**Tabelle 2-4: Mittelwerte der VOC-Werte für unterschiedliche Lüftungsstufen**

Mittelwert der VOC-Pegel [Digits]	Lüftung Stufe 1		Lüftung Stufe 3	
	Tag	Nacht	Tag	Nacht
Wohnraum	158	157	-	193
Abluft	151	150	-	166
Zuluft	121	121	-	122

Abbildung 2.2-4 zeigt die Häufigkeitsverteilung der VOC-Werte für Abluft und Wohnraum. Es sind jeweils zwei ausgeprägte Peaks für Zeiten mit und ohne Anwesenheit von Personen zu erkennen. Allerdings kann der Einfluss des Aquariums auf die Verteilung nur schwer abgeschätzt werden.



**Abbildung 2.2-4: Häufigkeitsverteilung der VOC-Messwerte in der Passivhaus-Wohneinheit**

Quellstärken konnten in dieser Wohneinheit nicht berechnet werden, da keine Informationen über den Volumenstrom in den verwendeten Lüftungsstufen vorliegen.

Fazit: Das Wochenprofil der Messungen in der Passivhaus-Wohnung zeigt weniger ausgeprägte Tagesprofile als dasjenige im Reihendhaus, was an der unterschiedlichen Anwesenheitsstruktur der Bewohner und dem Aquarium liegt. Die Höhe der gemessenen VOC-Konzentrationen liegt aber in einem ähnlichen Bereich wie beim Reihendhaus. Hier ist weiterhin zu berücksichtigen, dass die Messungen bei minimaler Lüftungsstufe durchgeführt wurden, so dass die hier erfassten LuQaS-Werte nicht denjenigen in einem Gebäude mit Lüftungsanlage im Auslegungsbetrieb entsprechen.

Kurze Stoßbelastungen, die vermutlich überwiegend aus Bad und Küchenbereich stammen und schnell wieder abfallen, können durch eine Auswertung auf Basis von 10- oder 30-Minuten-Mittelwerten eliminiert werden, so dass hier kaum mit einer „Überreaktion“ der Regelung zu rechnen ist.

Trotz der weniger stark ausgeprägten Tagesprofile kann aus den Messungen der Schluss gezogen werden, dass mit der geplanten Regelstrategie für die LuQaS-Sensoren eine Optimierung der Lüftung erreicht werden kann.

Mögliche Ursache für den vergleichsweise hohen Grundpegel an den letzten Messtagen könnte die erhöhte Raumtemperatur sein, die zu zusätzlichen Ausgasungen der Oberflächen führen könnte.

Die Messung zeigt das Auftreten von unerwarteten zusätzlichen Quellen für eine Belastung der Raumluft (hier durch ein Aquarium), auf die eine Luftqualitätsregelung entsprechend hätte reagieren können, ohne dass die Bewohner von der Belastung wussten.

## 2.3 Weitere Messungen zur Charakterisierung der LuQaS-Sensoren

Im Folgenden werden einige Einzelmessungen dokumentiert, die zum Verständnis der Reaktion der LuQaS-Sensoren in bestimmten Situationen hilfreich sind.

### Messung der Sprungfunktion in einem Büro

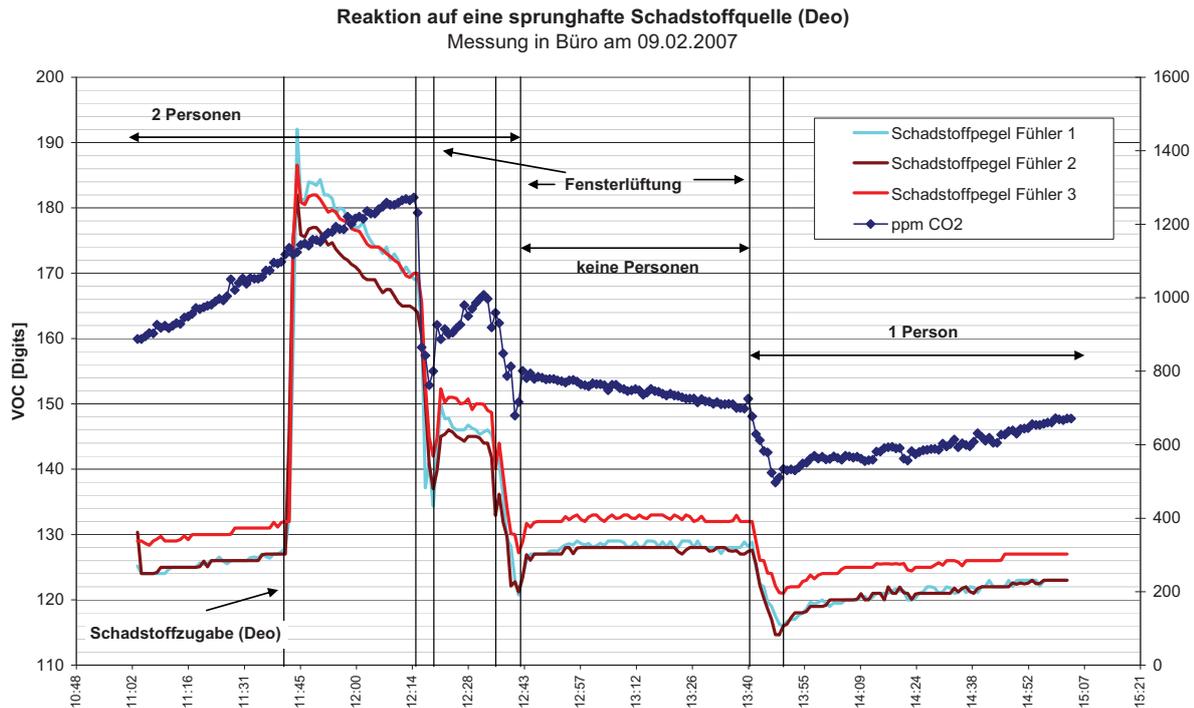
In einem Büro (Belegung mit zwei Personen) wurden bei geschlossener Tür VOC (3 Fühler im Dreieck senkrecht aufgestellt, siehe Abbildung 2.3-1) und CO<sub>2</sub> kontinuierlich gemessen (Abbildung 2.3-2). Nach einer halben Stunde, innerhalb der die Pegel der beiden gemessenen Parameter linear ansteigen, wurde mit 6x Pumpen Deo im Raum versprüht. Die VOC-Konzentration stieg bis auf ca. 180 Digits an. Danach wurde die Anklingphase beobachtet. Nach einer halben Stunde wurde für 4 Minuten gelüftet. Ein zweites Lüften erfolgte 15 Minuten später, anschließend eine Stunde ohne Personenbelegung. Danach wurde erneut für 10 Minuten gelüftet. In der Folgezeit war nur noch eine Person im Raum.

Vor der Zugabe von Duftstoff/Alkohol liegen Fühler 1 und 2 auf fast dem gleichen Wert. Nach der Zugabe von Deo steigt Fühler 1 am stärksten an (bis auf 190 Digits), Fühler 2 bleibt ca. 8 Digits dahinter, Fühler 3 liegt knapp unter Fühler 1. Nach dem ersten Lüften verlaufen Fühler 1 und 2 wieder nahezu identisch. Die Reaktion auf die Zugabe des Duftstoffs ist sehr kurz. Der Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration ist von der Deo-Exposition nicht beeinflusst und folgt nur der Personenbelegung und dem Lüftungsverhalten.



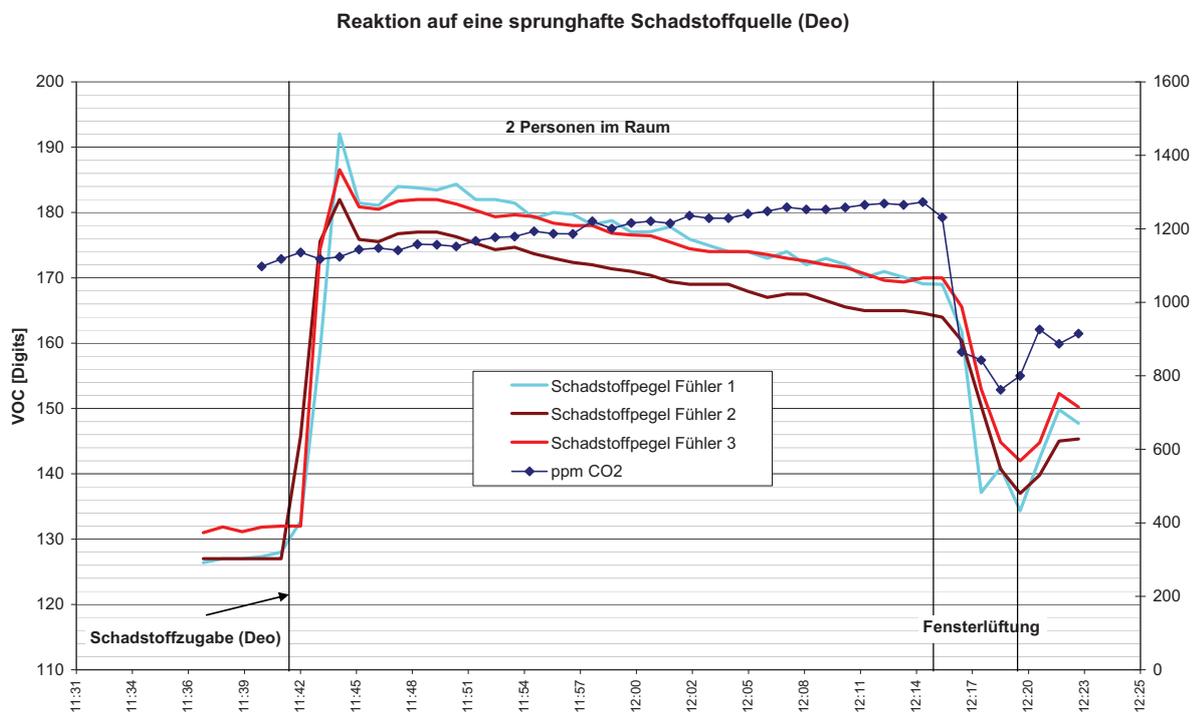
**Abbildung 2.3-1: Anordnung der Fühler**

Gegen 14:20 Uhr ist bei offener Bürotür das Deo mit der Nase immer noch wahrnehmbar, die LuQaS-Sensoren zeigen aber keine erhöhten VOC-Pegel mehr an (122 Digits). Eine mögliche Erklärung ist, dass der Anstieg der VOC-Konzentration überwiegend durch die Alkohole (Lösungsmittel) im Deo verursacht wurden, die Duftstoffe aber mit LuQaS evtl. gar nicht detektiert wurden oder sie sind in geringen Konzentrationen bereits sehr stark wahrnehmbar sind.



**Abbildung 2.3-2: Ermittlung einer Sprungfunktion des LUQAS-Sensors**

Die folgende Abbildung 2.3-3 zeigt den Ausschnitt von Freisetzung des Duftstoffs bis zum Ende des ersten Fensterlüftens.



**Abbildung 2.3-3: Ermittlung einer Sprungfunktion des LUQAS-Sensors, Ausschnitt der ersten Minuten**

Die Zeitverzögerung bis zum Ansprechen der Fühler liegt bei ca. einer Minute, d. h. innerhalb der ohnehin vorhandenen Totzeit des Sensors, der nur alle 60 Sekunden die Messwerte aktua-

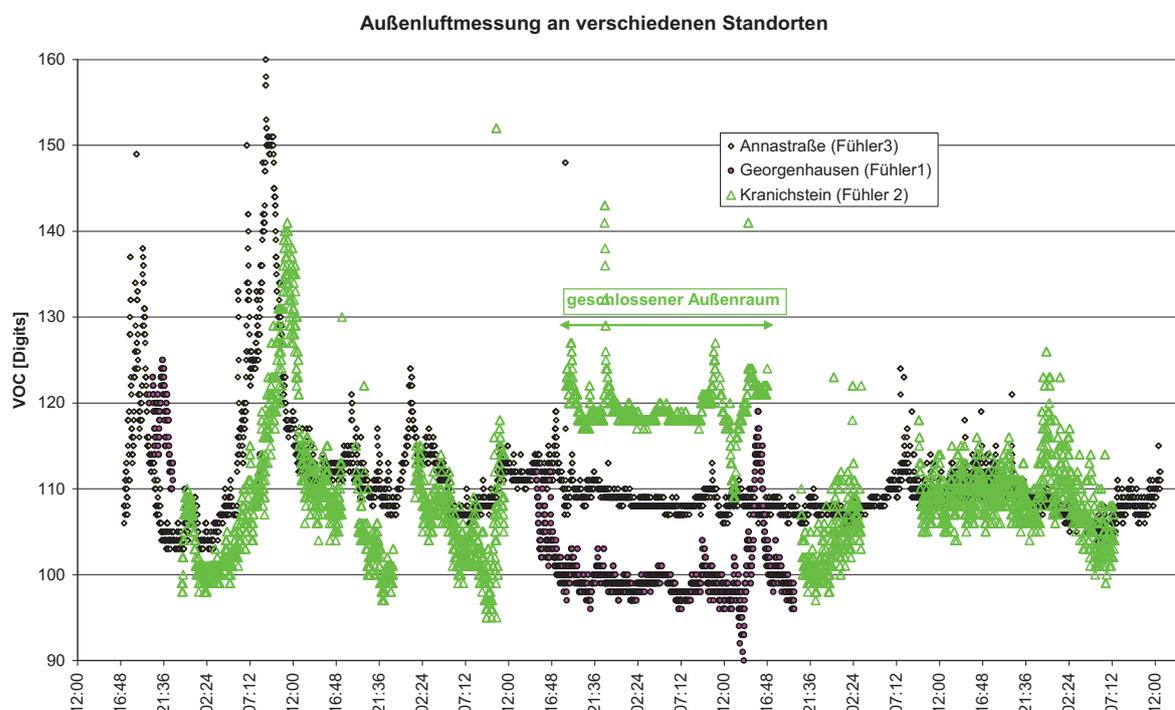
listiert. Der Maximalwert wird zwei Minuten nach der Stoffzugabe erreicht. Somit ist (für das hier verwendete Stoffgemisch) nicht von einer nennenswerten Zeitverzögerung bis zur Reaktion des Sensors zu rechnen.

Das Abklingverhalten wird überlagert vom weiteren Anstieg der humanen VOC-Produkte, was im Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration zu erkennen ist. Nach dem Öffnen des Fensters sinken die Messwerte sowohl für CO<sub>2</sub> als auch für VOC schlagartig ab, so dass auch hier nur von einer minimalen Zeitverzögerung und geringen Adsorptionsvorgängen am Sensor auszugehen ist.

### Parallele Außenluftmessung an verschiedenen Standorten

Im Institut Wohnen und Umwelt in Darmstadt, in Georgenhausen (ca. 10 km östlich von Darmstadt und in Darmstadt-Kranichstein (5 km nördlich des IWU) wurden vom 22. - 27.02.07 Messungen der Außenluft-VOC-Konzentration durchgeführt, die teilweise zeitlich synchron zu den anderen Messstellen erfolgten (Abbildung 2.3-4).

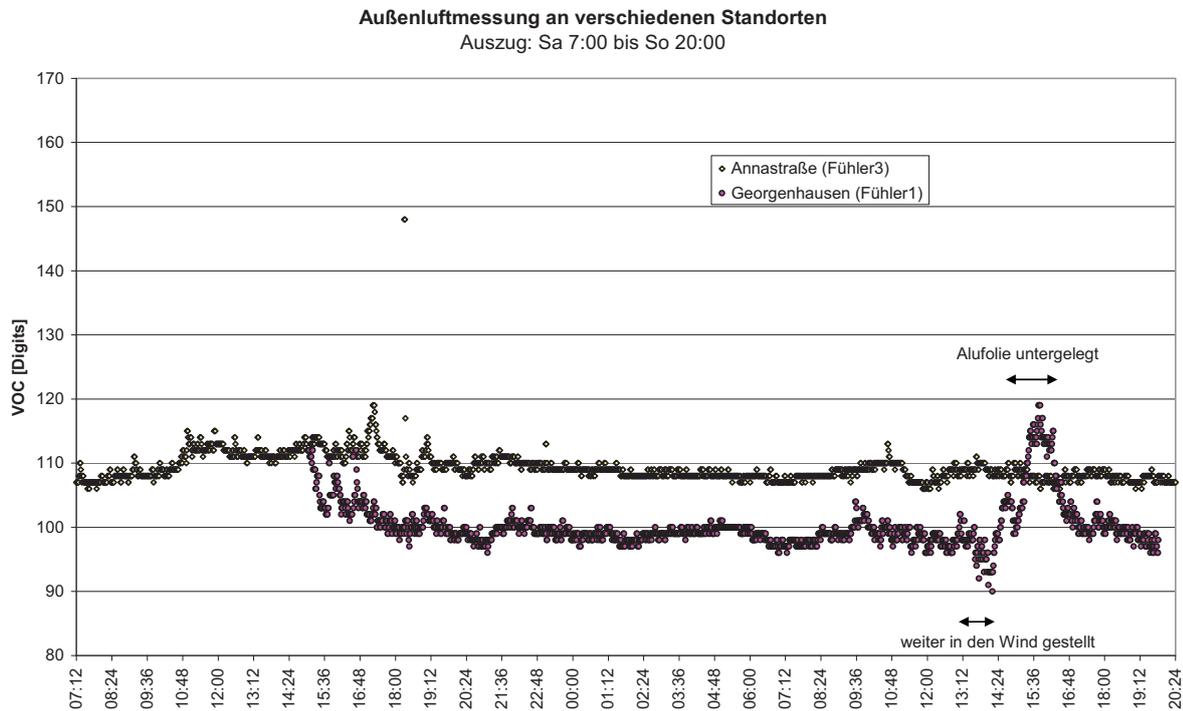
Auffällig sind die teilweise hohen Werte der VOC-Konzentration, die an allen drei Messstellen gefunden wurden. Zwischen Darmstadt-Stadt und Darmstadt-Kranichstein ist ein sehr ähnlicher Verlauf der Messwerte mit ca. 2 Stunden zeitlicher Verzögerung festzustellen. Zu Beginn der Messungen herrschte laut Messdaten der Messstation Darmstadt des HLUG Ost-Südost Wind. Nach 17 Stunden drehte der Wind auf westliche Richtung bei max. 1 m/s Windgeschwindigkeit. Somit sind die Verzögerungen im Verlauf der Messwerte plausibel. Ein deutlicher Güllegeruch in Georgenhausen am ersten Messtag hat sich nicht eindeutig in den Messwerten niedergeschlagen.



**Abbildung 2.3-4: Außenluft-VOC-Konzentration an verschiedenen Standorten**

Extrahiert man aus diesen Daten 1,5 Tage, so ergeben sich die Verläufe aus Abbildung 2.3-5. Fühler 1 (Landluft) liegt ca. 10 Digits unter Fühler 3. Allerdings besteht bei beiden Fühlern

ein unterschiedlicher Offset (siehe unten). Wird dieser berücksichtigt, fällt die Abweichung zwischen den Messorten geringer aus.



**Abbildung 2.3-5: Außenluft-VOC-Konzentration an verschiedenen Standorten, Auszug über eineinhalb Tage**

Zeitweise sind einzelne extreme Ausreißer zu erkennen. Möglicherweise schwanken Messungen an der Außenluft stärker, da der Sensor die erforderliche Temperatur nicht so exakt konstant halten kann.

Bei weiteren Messungen in einer ländlichen Region in der Pfalz wurden Messwerte für die VOC-Außenluftkonzentration zwischen 96 und 126 Digits gemessen. Bedeutender Einflussfaktor war hier offensichtlich der Betrieb von Holzfeuerungen im Umfeld der Messungen.

### Vergleichsmessungen der Fühler

Es wurden im Laufe der Untersuchungen immer wieder Vergleichsmessungen zwischen den Sensoren durchgeführt, um den relativen Drift der drei Sensoren gegeneinander zu ermitteln. Aussagen zum absoluten Drift der Fühler sind nicht möglich, da keine Referenzgase zur Verfügung standen. Für die Vergleichsmessungen wurden die Sensoren gemeinsam in eine Kunststoffbox gestellt und im Vergleich gemessen. Fühler 1 diente als (willkürliche) Referenz, die anderen beiden wurden mit ihm verglichen (Tabelle 2-5).

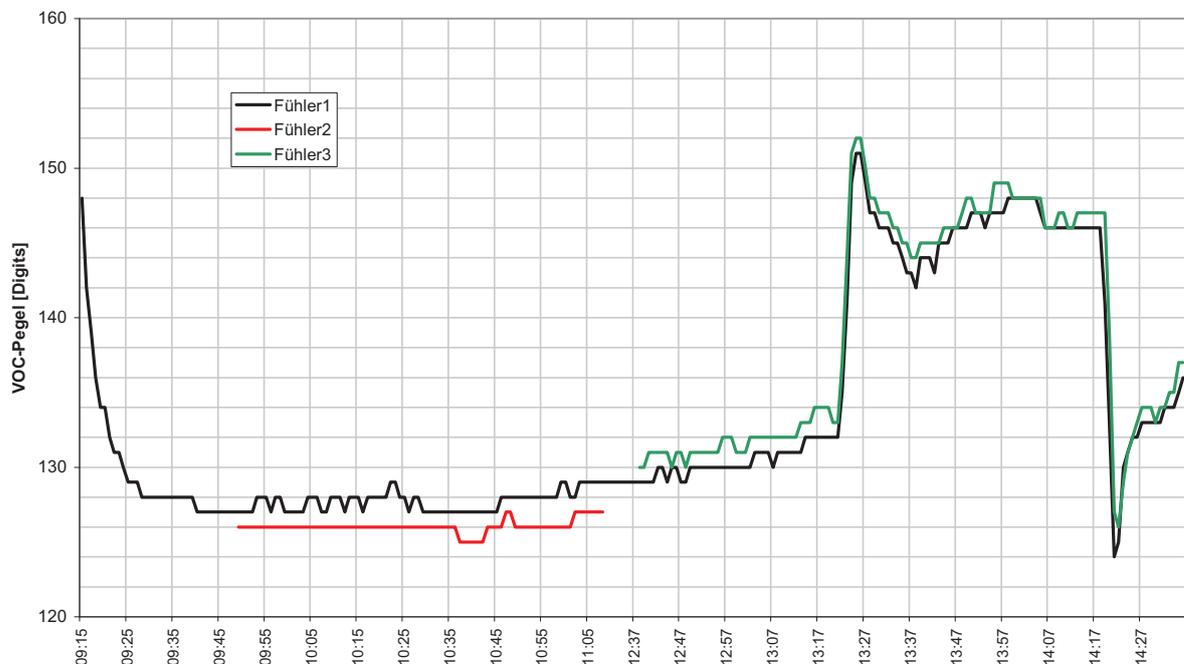
**Tabelle 2-5: Vergleich der Fühlerdifferenzen bei unterschiedlichen Messungen**

Messung	Fühler 2 (im Vergleich zu Fühler 1)	Fühler 3 (im Vergleich zu Fühler 1)
07.02.2007 erste Messungen	+ 5 Digits	+ 5 Digits
16.02.07 9 Tage nach Inbetriebnahme, Fühler 1 hat die meisten Betriebsstunden aller Fühler	+ 3,4 Digits	+ 6,3 Digits diese Differenz wurde durch kont. Außenluftmessungen mit Fühler 1 und 3 bestätigt;
27./28.02.07 nach drei Wochen	- 4,6 Digits	+ 2,4 Digits
15.03.07 nach 5 Wochen	-1,7 Digits	+1,1 bei hohen Absolutwerten

Anfangs wich Fühler 1 um 5 Digits von den beiden anderen ab. Diese Abweichung verschob sich mit zunehmender Betriebsdauer und führte nach ca. 5 Wochen zu einer Angleichung der Ergebnisse.

Teilweise wurden diese Vergleiche mit allen Fühlern gemeinsam, teilweise nacheinander durchgeführt. Abbildung 2.3-6 zeigt exemplarisch Ergebnisse dieser Vergleichsmessungen, wobei bei der Messung von Fühler 3 eine Erhöhung der Konzentration auftrat, die bei Fühler 2 nicht vorhanden war. Bei dieser Messung lagen die Fühler nur wenig auseinander. Fühler 2 liegt im Mittel 1,7 Digits unter Fühler 1, Fühler 3 1,1 Digits über Fühler 1.

**Vergleich der Fühlerwerte 15.03.2007**

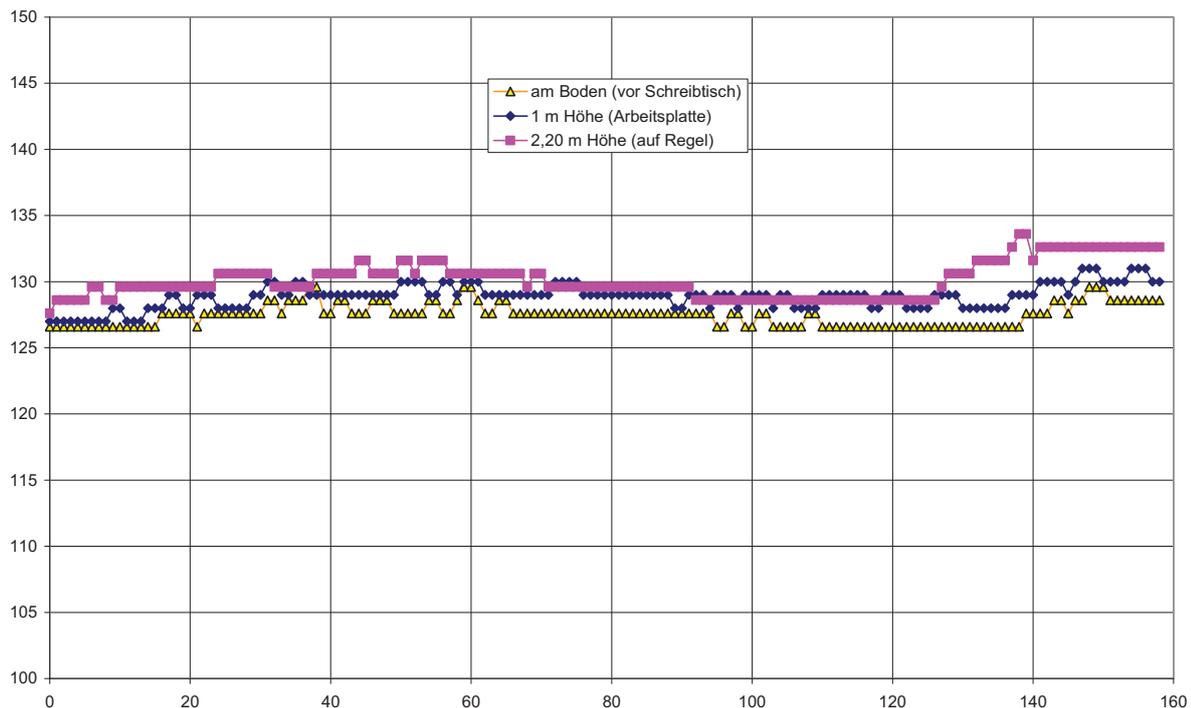


**Abbildung 2.3-6: Messergebnisse der verschiedenen Fühler im Vergleich**

Grundsätzlich ist aber zu berücksichtigen, dass die Höhe der Abweichung zwischen den Fühlern auch vom Absolutwert der VOC-Konzentration abzuhängen scheint. Da kein Prüfgas zur Verfügung stand, können sich die veränderlichen Abweichungen durch unterschiedliche Gaszusammensetzungen und damit verbunden unterschiedliche Messwerte bei nicht exakt gleicher Sensitivität für die einzelnen Gase ergeben. Als Konsequenz dieser Vergleichsmessungen ist festzuhalten, dass mit einer „Messunsicherheit“ von ca. 5 Digits beim Vergleich verschiedener Fühler gerechnet werden muss.

### Messungen in verschiedenen Höhen im Raum

Am 28.02.2007 wurden im Büro die drei Sensoren in verschiedenen Höhen im Raum aufgestellt (Abbildung 2.3-7). Fühler1 in 1m Höhe auf dem Schreibtisch, Fühler 2 in ca. 2,20 m Höhe auf dem Regal und Fühler 3 auf dem Boden. Die Messwerte wurden anschließend mit der gemessenen Differenz zu Fühler1 aus der Vergleichsmessung am gleichen Tag korrigiert. Im Ergebnis zeigt sich für die korrigierten Messwerte nur eine geringe Abweichung zwischen den verschiedenen Messorten im Raum mit der Tendenz zu höheren Messwerten bei höher liegenden Fühlern. Da für die LuQaS-Sensoren keine Toleranzbänder bekannt sind und die Ergebnisse der Vergleichsmessungen variieren, kann nur vermutet werden, dass die Schwankungen noch innerhalb der Fehlergrenzen liegen, der Einfluss der vertikalen Position aber nicht bedeutend ist.



**Abbildung 2.3-7: Korrigierte Messergebnisse in verschiedenen Höhen des gleichen Raumes**

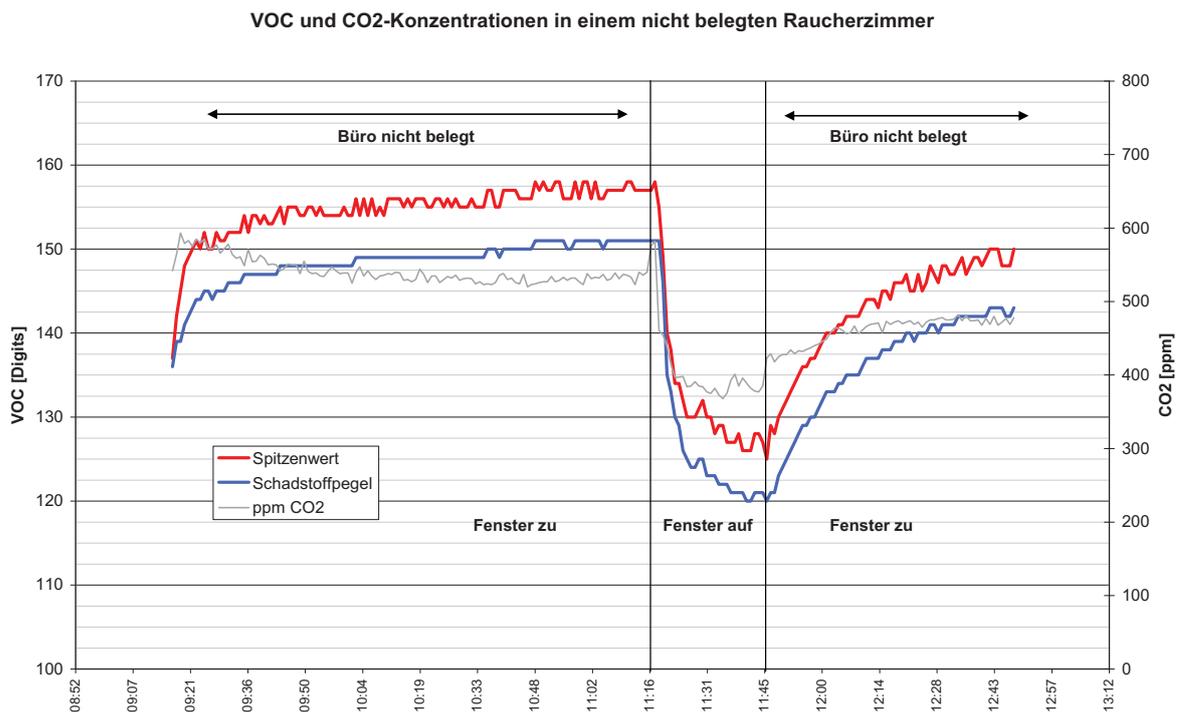
### Messung in einem Raucher-Büro

Im einem nicht belegten Büro eines Rauchers wurden VOC mit LuQaS und die Kohlendioxid-Konzentration mit einem CO<sub>2</sub>-Sensor parallel gemessen (Abbildung 2.3-8). Zur Zeit der Messung wurde seit ca. 18 h nicht mehr geraucht, es war jedoch ein deutlicher Rauchgeruch im Raum vorhanden.

Während die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Bereich von 550 ppm lag – der kleine Anstieg zu Beginn erfolgt während dem Aufbau der Messung – steigt der LuQaS-Wert innerhalb einiger Minuten auf ca. 150 Digits und in der Folgezeit dann langsam weiter an.

Nach Öffnen des Fensters sinkt der CO<sub>2</sub>-Wert auf 385 ppm (Außenluftwert), der LUQAS-Wert auf 120 Digits (ca. 25 Digits über Außenluftkonzentration), der Rauchgeruch ist aber immer noch deutlich wahrnehmbar. Nach 30 Minuten wird das Fenster wieder geschlossen. 20 Minuten später hat sich der LuQaS-Sensor wieder dem Ausgangswert vor der Fensterlüftung angenähert und liegt im Bereich, der bei den Wohnungsmessungen im Mittel bei Personenanwesenheit erreicht wird, obwohl sich niemand im Büro aufhält, während die CO<sub>2</sub>-Konzentration unter 500 ppm liegt.

Diese Messung zeigt, dass für Fälle mit speziellen Stofflasten (hier Zigarettenrauch) CO<sub>2</sub> als Führungsgröße der Raumluftqualität versagt und der LuQaS-Sensor hier das Empfinden der Nase besser wiedergibt.



**Abbildung 2.3-8: Vergleich von VOC und CO<sub>2</sub>-Messungen in einem Raucherbüro**

Es wurden noch zahlreiche weitere Messungen zu bestimmten häuslichen Emissionsquellen durchgeführt (Bürogeräte, Besprechungsräume, Wohnung mit geringer Dichtheit, Kaminofen und weitere Einzelmessungen in Passivhäusern), die jedoch keine zusätzlichen Aussagen bezüglich der Funktion und des Verhaltens der LuQaS-Sensoren lieferten.

### Fazit

Der LuQaS-Sensor reagiert schnell auf plötzlich auftretende Immissionen, und es ist keine nennenswerte Verzögerung im Abklingverhalten festzustellen. Die gemessene Abweichung zwischen den Fühlern nahm im Laufe der Zeit ab, es muss aber mit ca. 5 Digits Abweichung gerechnet werden. Bei Messungen mit besonderen (riechbaren) Lasten in der Raumluft (Deo, Zigarettenrauch, Holzfeuer, Personen) gab der Sensor erhöhte Werte aus, die jedoch nicht direkt mit der Intensität der Gerüche korrelieren (Deo wurde auch ohne erhöhtes Sensorsignal noch wahrgenommen). Im Wesentlichen kann der LUQAS-Sensor als „nasenkonguent“ bezeichnet werden und scheint für den geplanten Einsatz in Wohnungslüftungsanlagen geeignet zu sein. In der Außenluft ergeben sich Schwankungen, deren jahreszeitlicher Verlauf und die Maxima noch nicht bekannt sind. Ggf. sind Einflüsse der Außentemperatur oder Außenluftfeuchte auf den Messwert möglich.

### 3 Entwicklung eines Regelungskonzeptes

Im folgenden Kapitel wird die Entwicklung eines Regelungskonzeptes für die luftqualitätsgeführte Lüftung beschrieben. Es werden dabei nur die Entwicklungsstränge dargestellt, die detailliert untersucht wurden.

#### 3.1 Ansätze zur luftqualitätsgeführten Regelung

Zur Umsetzung der Information der gemessenen Luftqualität in eine geeignete Regelstrategie gibt es eine Reihe unterschiedlicher Ansätze.

##### 3.1.1 Betrachtung unterschiedlicher Reglertypen

Grundsätzlich bestehen mehrere Möglichkeiten eine Luftqualitätsregelung regelungstechnisch umzusetzen:

###### Stetige Regelung

Eine stetige Regelung, die also bei jeder Abweichung des Ist-Wertes vom Sollwert in die Anlage eingreift und versucht die Sollwertabweichung zu minimieren, wird in der Technik mit PI- bzw. PID-Reglern realisiert (Abbildung 3.1-1). Zur Ermittlung von stabilen Regelparametern wird meist ein mathematisches Model des Regelkreises erstellt und so vor Inbetriebnahme bereits das spätere Regelverhalten der Anlage beschrieben.

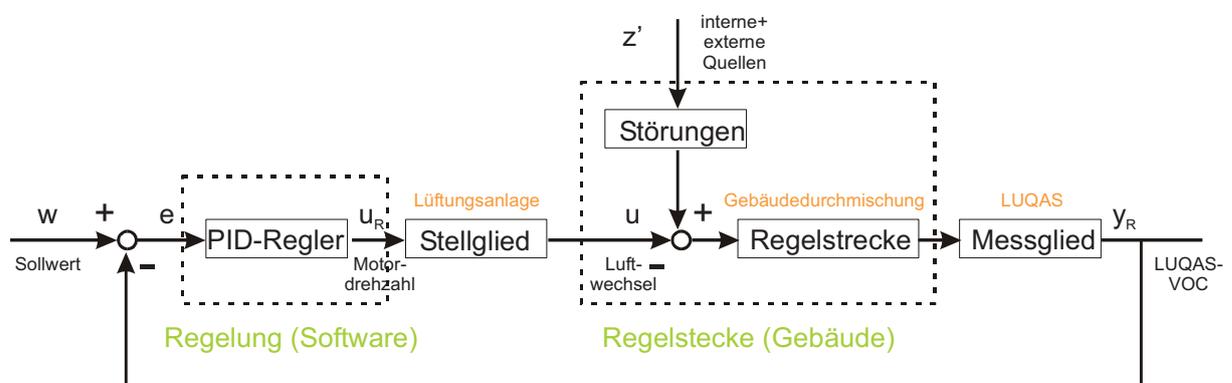


Abbildung 3.1-1: Blockschaltbild einer Regelung mit PID-Regler

Diese Vorgehensweise ist bei ganzen Gebäuden aufwändig, da die Durchströmung des Gebäudes und Totzeiten durch Massetransport im Kanalnetz beschrieben werden müssen. Außerdem hat das Messglied, der LuQaS-Sensor, keine lineare Charakteristik, was den Aufwand für die mathematische Beschreibung weiter erhöht. Schließlich ist zu erwarten, dass Adsorptionsvorgänge von VOCs in Wänden und Einrichtungsgegenständen von den Eigenschaften des jeweiligen Stoffes abhängen, die Auswirkungen auf den Summenwert des LuQaS-Sensors dann aber nicht mehr vorhergesagt werden können.

Der Ansatz, die Regelparameter vor Ort, z. B. durch das Ziegler-Nichols-Verfahren zu ermitteln, ist kaum möglich, weil keine definierten VOC-Lasten mit definierten LuQaS-Messwerten vorliegen, mit denen man die Regelung definiert in selbstständige Schwingung

versetzen kann. Das Kalibriergas Kohlenmonoxid scheidet wegen seiner Toxizität für einen Einsatz in Wohngebäuden aus. Einzige praktikable Lösung wäre eine rein empirische Ermittlung der Regelparameter, die jedoch bei jedem Gebäude erneut durchgeführt werden müsste. Berücksichtigt man zusätzlich, dass ein genaues Erreichen des Sollwertes nicht Ziel der Regelung ist, sondern nur die Volumenstromreduktion bzw. -erhöhung unter oder oberhalb einer bestimmten Schwelle, erscheint der Aufwand zur Parametrierung der stetigen Regelung unangemessen hoch.

Eine weitere Schwierigkeit der stetigen Regelung ist der erforderliche Abgleich zwischen Zu- und Abluft in allen Lüftungszuständen, da die Regelung kontinuierliche Volumenströme einstellt, bei denen die Balance zwischen Zu- und Abluft kontinuierlich gewährleistet sein muss.

### Fuzzy-Logic--Regelung

Die Fuzzy-Logic-Regelung arbeitet nicht mit einem festen Sollwert, sondern die Regelaufgabe wird „verbal“ (linguistisch) beschrieben, d. h. es werden mehrere Bedingungen formuliert, die auf das Verhalten des Reglers einen Einfluss besitzen. Sie eignet sich besonders für Regelkreise, deren mathematische Beschreibung nur schwer möglich ist. Wird die Stellgröße, im Fall der Luftqualitätsregelung der Luftvolumenstrom bzw. die Lüfterspannung, stetig verändert, so besteht die gleiche Schwierigkeit der Volumenstrombalance wie beim PID-Regler. Fuzzy-Algorithmen sind nicht einfach in Standardregler zu implementieren, weiterhin benötigen sie auch mehr Rechenaufwand, so dass eine spätere unkomplizierte Integration von Fuzzy-Algorithmen in den Standard-Regler einer Lüftungsanlage nicht gewährleistet ist.

### Mehrpunktregler

Mehrpunktregler besitzen nur eine begrenzte Anzahl von Veränderungen der Stellgröße. Im einfachsten Fall gibt es zwei Werte (hier Volumenströme), die beim Unter- oder Überschreiten des Sollwertes eingestellt werden. Reichen zwei verschiedene Werte nicht aus, so kann ein Drei- oder Vierpunktregler eingesetzt werden. Bedingt durch die begrenzte Anzahl von Stellwerten ist die Regelabweichung bei Mehrpunktreglern größer als bei stetigen Reglern. Dem steht eine einfachere Umsetzung gegenüber. Um zu häufige Volumenstromänderungen der Lüftungsanlage zu verhindern, versieht man Mehrpunktregler meist mit einer Hysterese, die einen Regeleingriff erst bei einer bestimmten Sollwertabweichung auslöst.

In dieser Phase des Projekts wird nur die Mehrpunktregelung in Form eines Dreipunktreglers weiter untersucht. Die einzelnen Module dieses Reglers sind in Kapitel 3.3.3 dargestellt. Die Regelung kann im Laufe der Messphase weiter optimiert werden.

### 3.1.2 Betriebsweisen der Lüftungsregelungen

Unabhängig vom Reglertyp kann die Regelstrategie an unterschiedlichen Schwerpunkten orientiert werden. Es werden im Folgenden nur Zu- und Abluftanlagen mit drei Volumenstromstufen betrachtet.

#### Energieorientierte Betriebsweise

Ziel der energieorientierten Betriebsweise ist die weitere Verringerung der Energieverbräuche für Heizung und Lüfterstrom. Bei ihr wird unterstellt, dass die Grund-/Normallüftung (d. h. mit Auslegungsvolumenstrom) die Maximalstufe bildet und in Zeiten mit geringen VOC-Konzentrationen bzw. wenn keine Personen anwesend sind, kann der Volumenstrom der Lüftungsanlage reduziert werden. Dadurch kann der Energieverbrauch bei Heizung und Strom reduziert werden (die Größe der Einsparungen wird in Kapitel 3.3.2 diskutiert). Abbildung 3.1-2 zeigt einen typischen Verlauf der VOC-Konzentration in einem Passivhaus und verschiedene Schwellwerte. Es werden zwei Schwellwerte definiert (Dreipunktregelung), bei deren Unterschreitung der Volumenstrom je um einen festen Wert reduziert wird. Im dargestellten Beispiel wird beim Absinken der VOC-Werte unter 135 Digits (1. Schwelle) der Volumenstrom der Grundlüftung um 30 % reduziert. Bei einer Unterschreitung der zweiten Schwelle bei 125 Digits wird der Volumenstrom auf 40 % reduziert, so dass noch 60 % des Volumenstroms der Grundlüftung verbleiben.

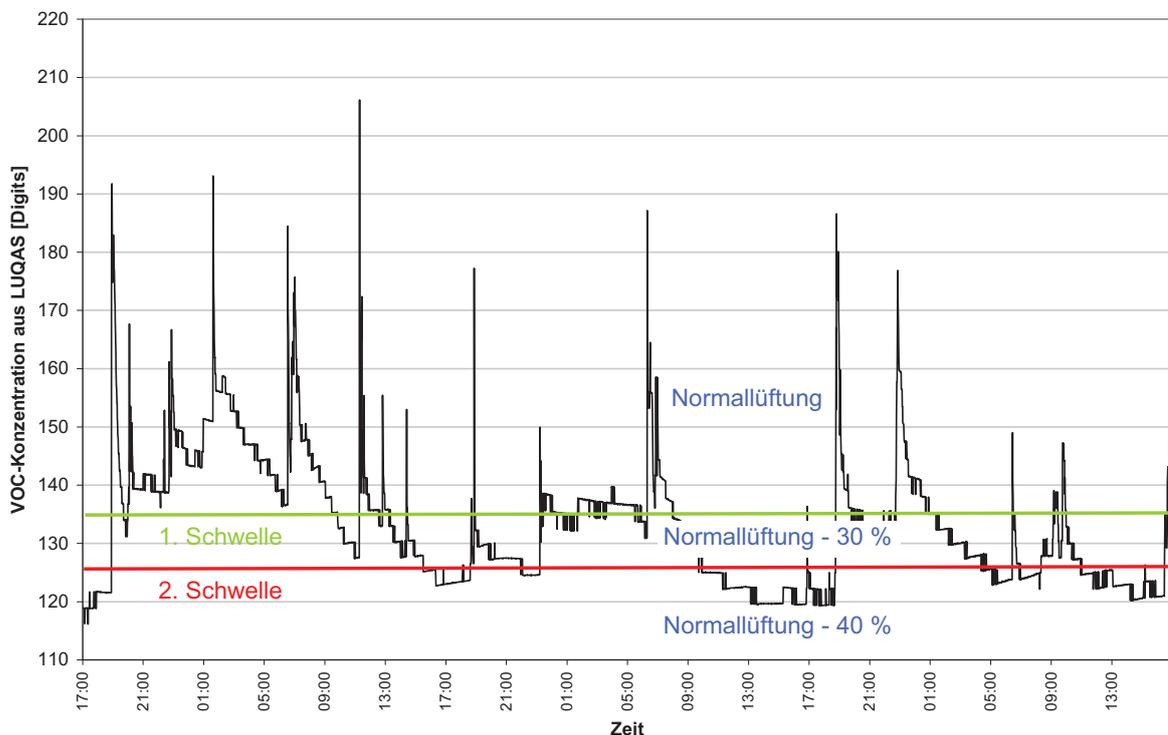
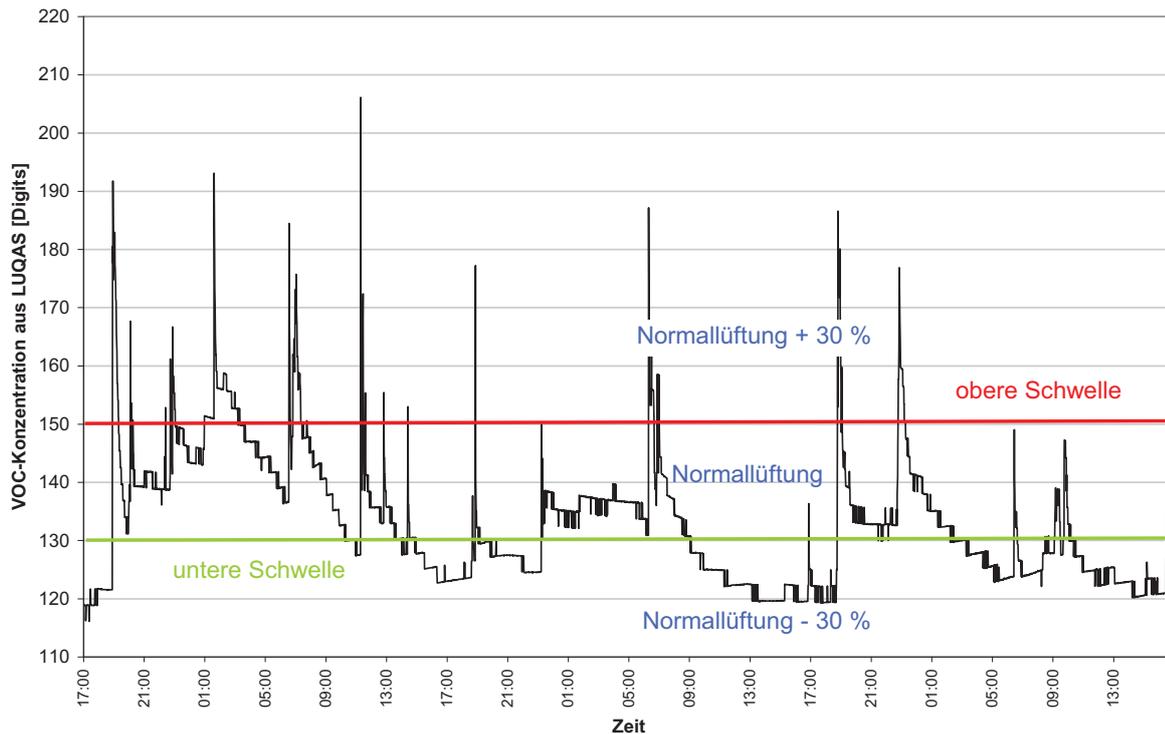


Abbildung 3.1-2: Schema der energieorientierten Betriebsweise

### Komfortorientierte Betriebsweise

Schwerpunkt der komfortorientierten Betriebsweise ist die Verbesserung der Luftqualität, d. h. die Reduktion der VOC-Konzentration. Auch hier wird der Anlagenvolumenstrom bei niedrigen VOC-Konzentrationen reduziert, kann bei hohen Konzentrationen aber auch erhöht werden. Der Mehrverbrauch an Strom und Heizwärme in den Phasen erhöhter Luftmenge kann durch die Absenkezeiten teilweise kompensiert werden, so dass kein Mehrverbrauch entstehen muss. Dieser wäre beim Heizwärmeverbrauch in Gebäuden mit Wärmerückgewinnung wegen der hohen Rückwärmehzahlen auch sehr begrenzt.



**Abbildung 3.1-3: Schema der komfortorientierten Betriebsweise**

Abbildung 3.1-3 zeigt die Anwendung der Schaltschwellen bei komfortorientierter Betriebsweise. Ausgehend von der Grund-/Normallüftung wird bei einer Überschreitung der oberen Schwelle der Luftwechsel im Gebäude um 30 % erhöht, es wird mehr frische Luft in das Gebäude gefördert und die VOC-Konzentrationen sinken. Bei einer Unterschreitung der unteren Schwelle wird der Luftwechsel um 30 % reduziert, da unterstellt wird, dass niemand im Gebäude anwesend ist bzw. sehr geringe Verunreinigungslasten vorliegen.

Beide Betriebsweisen (energieorientiert und komfortorientiert) werden in den Kapiteln 3.3.2 betrachtet und ausgewertet. Für die Feldphase sollen beide Konzepte erprobt werden.

Unabhängig von den beiden oben beschriebenen Regelkonzepten stellt sich die Frage, ob absolute Messwerte der VOC-Konzentrationen die Basis des Regeleingriffs bilden sollen, oder Konzentrationsdifferenzen. Die Ansätze werden im Folgenden kurz beschrieben.

### Regelung auf Absolutwerte

Bei der Regelung auf Basis von Absolutwerten wird der Regeleingriff durch den Vergleich des Sollwertes mit einem einzelnen, absoluten Messwert, z. B. der Abluft-VOC-Konzentration berechnet. Durch Absolutwerte können Verschiebungen im Niveau der Pegel erkannt werden. Allerdings kann bei dieser Implementierung nicht auf Situationen reagiert werden, in denen z. B. die Außenluftkonzentration schlechter ist als die Innenluftkonzentration. Ist dies gewünscht, muss die Differenz zwischen Abluft- und Zuluftkonzentration zusätzlich ausgewertet werden. Allerdings ist die Frage zu stellen, ob bei dauerhaft hohen Zu- oder Abluftkonzentrationen eine Wohnungslüftungsanlage, die nach DIN 1946-6 ausgelegt ist, für die Abfuhr solcher Belastungen geeignet ist oder andere Maßnahmen ergriffen werden müssen. Für kurzfristige „Stoßbelastungen“ könnte der Luftqualitätssensor aber durchaus eingesetzt werden.

### Regelung auf Konzentrationsdifferenzen

Wird die Differenz zwischen Ab- und Zuluftkonzentration als Kriterium für den Regeleingriff ausgewertet, sind zwar Aussagen zur zu erwartenden Effizienz des Luftaustauschs möglich, es kann aber nicht mehr festgestellt werden, ob die Pegel insgesamt kontinuierlich ansteigen, z. B. durch einen Sensordrift. Die Regelung auf Konzentrationsdifferenzen alleine liefert somit zu wenig Information.

### Fazit:

Da die VOC-Zu- und -Abluftkonzentrationen ohnehin mit separaten Sensoren gemessen werden müssen, weil der LuQaS-Sensor keine direkten Differenzmessungen ermöglicht und bei der Regelung auf Absolutwerte auch Langzeitdrifts erkannt werden können, erscheint diese für die Luftqualitätsregelung besser geeignet. Zusätzlich sollte jedoch auch die Differenz zwischen Ab- und Zuluft zur Berücksichtigung der Außenluftqualität ausgewertet werden.

### **3.1.3 Ansätze zur Ermittlung von Sollwerten**

Es liegen bisher kaum LuQaS-VOC-Messwerte Dritter aus Gebäuden mit Lüftungsanlagen vor (siehe Kapitel 1). Aus diesem Grund ist die Bestimmung von geeigneten Schwellwerten für den Regler, gleich welcher Bauart, nicht einfach. Ebenso fällt es schwer, aus dem LuQaS-Messwert funktionale Soll- oder Grenzwert abzuleiten. Trotzdem können mit Hilfe des LuQaS-Sensors menschliche Aktivitäten und Emissionen aus dem Gebäude gemessen werden.

Bei den folgenden Betrachtungen wird der Begriff Sollwert nicht im regelungstechnischen Sinn verwendet, d. h. die Regelung soll nicht versuchen diesen Wert einzustellen, sondern als Zielwert der Luftqualität, bei deren Unter- oder Überschreitung die Luftmengen verändert werden.

Als Maxime bei der Bestimmung der Sollwerte wird unterstellt, dass die Luftqualitätsregelung sich bei der Beurteilung ihrer Effizienz immer mit der Standardlüftungsanlage im Normalbetrieb vergleichen muss. Sie muss somit nicht bessere VOC-Konzentrationen liefern als diese Standardanlage.

Folgende Verfahren zur Festlegung von Sollwerten für die Regelung wurden untersucht:

#### Sollwert vom Nutzer

Hier gibt der Nutzer den Sollwert vor, unterhalb dessen die Lüftung reduziert oder auf Party-Stufe erhöht wird. Der Nutzer entscheidet dies aufgrund seiner Zufriedenheit mit der aktuellen Luftqualität. Allerdings tritt eine Adaption der Nase an die Geruchsstoffe der Luft auf (siehe Kapitel 1), so dass nach kurzer Zeit die Luftqualität kaum noch beurteilt werden kann. Außerdem birgt dieses Vorgehen die Gefahr, dass der Sollwert bei einem bestimmten Wert „vergesen“ wird, d. h. ein sehr niedriger Sollwert bleibt auch dann eingestellt, wenn der Nutzer mit einem höheren Sollwert mit höherer Energieeinsparung zufrieden wäre. Die Möglichkeiten der Regelung würden dadurch eingeschränkt.

Eine Variante des Nutzersollwertes entsteht, wenn die Regelung dem Nutzer Orientierungswerte zur Häufigkeit bestimmter VOC-Konzentrationen oder zur möglichen Energieeinsparung gibt. Diese Variante ist nur für interessierte Nutzer geeignet. Ein Bewohner, der von der Lüftungsanlage einen unauffälligen Betrieb im Hintergrund erwartet, wird sich nicht mit diesen Angaben beschäftigen wollen.

#### Automatische Sollwertbestimmung

Ein Ansatz zur Festlegung der Sollwerte ist die statistische Auswertung der sich im Gebäude einstellenden VOC-Konzentrationen. Wird entweder während einer Initialisierungsphase oder kontinuierlich die VOC-Konzentration bezüglich der Häufigkeitsverteilung bestimmter Klassen ausgewertet, so kann festgelegt werden, welche Werte in dem entsprechenden Gebäude üblich, erhöht oder niedrig sind (gebäude- und nutzerabhängig Werte). Diese dienen dann zur Festlegung von Sollwerten.

Wird eine solche Auswertung während einer Initialisierungsphase nach Inbetriebnahme der Lüftungsanlage durchgeführt, so müssen in diesem Zeitraum alle Fenster geschlossen sein. Offene Fenster würden die statische Auswertung verfälschen. Die Auswertung muss darüber hinaus regelmäßig wiederholt werden, um auf Veränderungen der VOC-Quellen im Gebäude zu reagieren. Insbesondere nach der Errichtung des Gebäudes ist in den ersten Monaten mit höheren Messwerten zu rechnen. Um das Abklingen dieser „Neubaukonzentration“ berücksichtigen zu können oder auch neue Quellen, z. B. aus Möbeln, berücksichtigen zu können, ist eine regelmäßige Wiederholung der Testsequenz erforderlich. Sie sollte ca. alle drei Monate durchgeführt werden. Besonders im Sommer, wenn viele Fenster geöffnet sind, ist dies jedoch nur schwer möglich.

#### Automatische Sollwertbestimmung mit Berechnung unbeeinflusster VOC-Konzentrationen

Ein alternativer Ansatz ist die unbeeinflusste VOC-Konzentration kontinuierlich aus den Quellstärken zu errechnen und statistisch auszuwerten. Diese Variante der oben beschriebenen automatischen Sollwertbestimmung benötigt keine Testsequenzen. Berücksichtigt man dabei die Ergebnisse der DrD-Sequenzen (siehe Teilbericht zur DrD-Methode), so können auch Zeiten mit Fensterlüftung ausgeklammert werden. Diese Vorgehensweise soll in den Prototypen erprobt werden.

### Automatische Sollwerte mit Quellstärken

Mit den VOC-Messwerten in Zu- sowie Abluft und dem aktuellen Volumenstrom können auch die Quellstärken im Haus berechnet werden. Gelingt es die nutzerabhängige Komponente dieser Quellstärke zu extrahieren (statistische Auswertung, Grundpegel), kann diese für den Regeleingriff verwendet werden (siehe auch Kapitel 2.1.5). Für die Quellstärke liegen bisher keine Erfahrungen vor, weshalb eine Festlegung der Grenzen zurzeit kaum sinnvoll möglich ist. Im Verlauf der Messphase kann aus den aufgezeichneten Messwerten auch die Quellstärke berechnet werden, so dass danach weitere Einsatzmöglichkeiten der Regelung über Sollwerte der Quellstärke untersucht werden können.

### Weitere Möglichkeiten zur Regelung, die nicht weiter verfolgt wurden

Nach einer Lernphase zur Ermittlung der Anfangswerte könnte der Nutzer die Luftqualität oder die Einsparung prozentual verschieben und so individuell anpassen. Hier ergibt sich aber wie bei der Nutzervorgabe von Sollwerten das Problem, dass dauerhaft energetisch nicht optimale Sollwerte eingestellt bleiben, ohne dass der Nutzer dies explizit wünscht.

Die Regelung kann darüber hinaus das Auftreten von VOC-Spitzen in den Messwerten auswerten und bei Ausbleiben von Spitzen die Lüftung reduzieren, da dann ein leeres Gebäude unterstellt wird. Dies wäre keine Sollwertbestimmung, sondern eine eigene Regelstrategie.

Auf kontinuierliche Lasten könnte eine solche Regelstrategie aber nicht reagieren.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Auswertung der Gradienten der VOC-Konzentration, um auf schnelle Anstiege zu reagieren. Bei zu hohen Werten, die langsam angestiegen sind, kann diese Art der Regelung aber nicht adäquat reagieren.

### Fazit Sollwertbestimmung

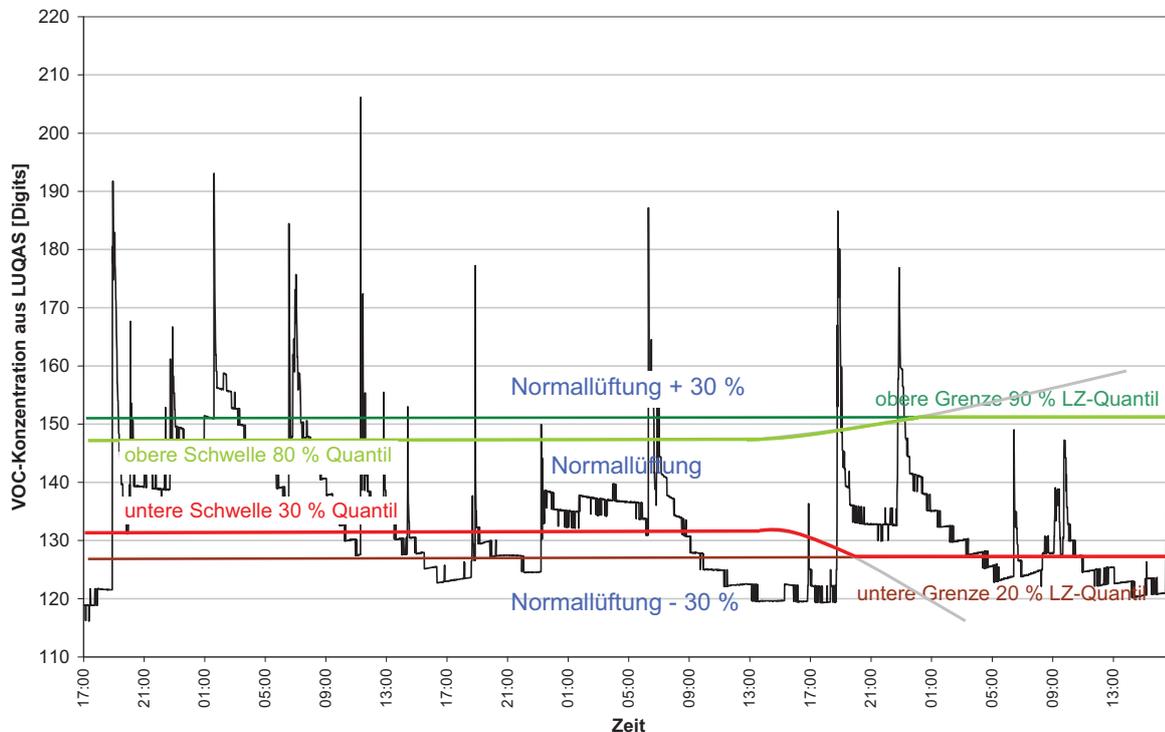
Ziel der Regelung ist die kontinuierliche Einstellung möglichst optimaler Luftqualität. Da für den Nutzer die Vorgabe von Sollwerten schwierig ist und dabei auch die Möglichkeiten dynamisch auf besondere Quellen oder Abwesenheiten zu reagieren verzichtet wird, erscheint nur eine Berechnung der Sollwerte über eine statistische Auswertung der Einzelmesswerte als zukunftsweisender Ansatz. Aus diesem Grund soll die automatische Sollwertbestimmung aus den Messwerten durch statistische Auswertung in der Messphase weiter verfolgt werden. Um regelmäßige Testsequenzen zu vermeiden, erscheint die kontinuierliche Berechnung einer ungestörten VOC-Konzentration mit anschließender statistischer Auswertung am geeignetsten und soll in der Feldphase erprobt werden.

## **3.1.4 Spezielle Aspekte der Regelung**

### Langfristsollwerte

Bei der automatischen Bestimmung der Sollwerte muss berücksichtigt werden, dass eine Sollwertbestimmung z. B. während der Sommerferien mit längerer Abwesenheit der Bewohner nicht sinnvoll ist bzw. ein in einer solchen Phase bestimmter, sehr niedriger Wert nicht nach der Rückkehr der Bewohner zu schlechterer Luftqualität oder höherem Energieverbrauch führen darf. Dem kann durch einen zweiten Sollwert begegnet werden, der langfris-

tig (z. B. über 6 Monate) berechnet wird und dessen Grenzen weiter auseinander liegen als der Kurzfristsollwert, der aus den Daten z. B. der letzten Woche bestimmt wird. Würden die kurzfristigen Grenzen die langfristigen unter- bzw. überschreiten, so könnten diese als Begrenzung wirken.



**Abbildung 3.1-4: Darstellung der Begrenzung der (Kurzfrist-)Sollwerte durch längerfristige Grenzen**

Abbildung 3.1-4 zeigt beispielhaft die Vorgehensweise mit kurz- und langfristigen Grenzen. Aus den Messwerten der letzten 7 Tage wird bei einer Regelung die obere Schwelle z. B. aus dem 80 %-Quantil der Messwerte und die untere Schwelle aus dem 30 %-Quantil berechnet. Gleichzeitig wird über ein halbes Jahr eine Langfriststatistik mitgeführt, die die obere Grenze beim 90 %-Quantil und die untere Grenze beim 20 %-Quantil festlegt. Unter- bzw. überschreiten die kurzfristigen Grenzen die etwas weiter gefassten Langfristgrenzen, wirken diese als Begrenzung und verhindern ein Wegdriften der Kurzfristwerte.

Die Verfahren für die exakte Berechnung der einzelnen Grenzen werden im Rahmen der Entwicklung der Prototypen festgelegt.

### Überwachung Außenluftqualität

Die Luftqualitätsregelung sollte überprüfen, ob die zugeführte Luft in der Lage ist, die Luftqualität im Gebäude zu verbessern. So ist es u. U. nicht sinnvoll die Lüftungsanlagen während starker Geruchsentwicklung in der Umgebung im Normalbetrieb zu betreiben, sondern sie sollte dann den Volumenstrom deutlich reduzieren oder vorübergehend ganz abschalten. Einzelne schlechte Messwerte der Außenluftqualität dürfen jedoch nicht sofort zu einer Abschaltung der Anlage führen, sondern die Außenluftqualität muss mindestens 2 - 5 Messwerte

(d. h. Minuten) schlechter sein als die Innenluftqualität. Alternativ kann das Produkt aus Konzentrationsdifferenz und Zeit ausgewertet werden. Dadurch kann schneller auf Spitzenwerte reagiert werden, ohne dass einzelne Messfehler zu einer Reaktion der Lüftungsanlage führen. Diese Funktionalität könnte mit dem Luftqualitätssensor realisiert und ggf. in der Feldphase umgesetzt werden.

### Feuchtegrenzen

Während bestimmter Phasen des Jahres ist nicht nur die Emission von Kohlendioxid und VOC der entscheidende Antrieb für die Lüftung, sondern auch die Feuchteentwicklung im Gebäude. Aus diesem Grund sollten Feuchtegrenzen bei der Luftqualitätsregelung eingeführt werden, die eine weitere Reduktion bzw. Erhöhung des Volumenstroms verhindern, wenn dies nicht sinnvoll ist.

In der Übergangszeit oder im Sommer gibt es Obergrenzen der Raumluftheuchte, die nicht überschritten werden sollten. Da die Feuchteproduktion in einem Gebäude überwiegend in Ablufträumen auftritt, liegen die Messwerte der Abluftheuchte höher als die tatsächliche Raumluftheuchte im gesamten Gebäude. Aus diesem Grund kann für die Begrenzung der Raumluftheuchte der Messwert aus der Abluft gut herangezogen werden. Überschreitet die Abluftheuchte die Grenze von ca. 75 % über eine längere Zeit (z. B. über einen Tag), dann wird bei energieorientierter Betriebsweise die Grundlüftung eingestellt, bei komfortorientierter Betriebsweise die hohe Lüftungsstufe.

Im Winter kann mit einer solchen Feuchteüberwachung das Absinken der Raumluftheuchte ggf. in gewissem Umfang begrenzt werden. Dann muss beim Unterschreiten einer Abluftheuchte von 40 % der Volumenstrom reduziert werden, wenn die übrigen Parameter dies zulassen.

Bei den Feuchtegrenzen ist es weiterhin sinnvoll, die Grenzen in Abhängigkeit des energetischen Standards des Gebäudes bzw. der Jahreszeit festzulegen, da bei besser gedämmten Gebäuden höhere Feuchten toleriert werden können. Entscheidend für die Bewertung sind dabei die ungünstigsten Wärmebrücken des Gebäudes.

### Sommertemperaturen

Eine weitere Option der Luftqualitätsregelung besteht in Kombination mit der DrD-Methode. Wenn im Sommer die Innentemperatur über 26 °C liegt, die Außentemperatur z. B. 5 Kelvin kühler ist als die Innentemperatur und die DrD-Methode feststellt, dass alle Fenster geschlossen sind, kann der Volumenstrom auf maximale Stufe eingestellt werden, um mit der Außenluft das Gebäude etwas abzukühlen. Eine solche Sommerkühlung erreicht zwar nicht die Effizienz einer Querlüftung über die Fenster, kann aber die Situation bei hohen Innentemperaturen verbessern.

Eine Variante der Sommerlüftung überprüft z. B. bei Raumtemperaturen über 23 °C die Zulufttemperatur. Liegt diese mindestens 3 Kelvin über der Raumtemperatur, kann durch eine Reduktion des Anlagenvolumenstroms der Anstieg der Raumtemperatur gebremst werden (Sommerhitzelüftung). Hierzu sind jedoch Zusatzinformationen erforderlich. Dieser Eingriff sollte nicht erfolgen, wenn die Anlage sich im reinen Abluftbetrieb befindet. Sind Fenster dauerhaft geöffnet, so kann ohnehin der (Zuluft-)Volumenstrom reduziert werden. Für diese

Sommerreduktion müssten weitere VOC-Grenzen definiert werden, die festlegen, wie hoch der maximale VOC-Pegel sein darf, bei dem noch eine Reduktion des Volumenstromes durchgeführt werden kann. Auch ist dann die Raumluftfeuchte als wichtiger Parameter für den empfundenen Komfort zu berücksichtigen.

Wenig sinnvoll ist eine Sommerhitzeregulung, wenn die Zuluft über den Wärmetauscher geführt wird, da hierbei die Zulufttemperatur bereits durch die kühlere Abluft reduziert wird. Nur im Bypassbetrieb ergeben sich sinnvolle Einsatzbedingungen für die Sommerhitzlüftung. Gleiches gilt beim Betrieb über einen Erdreichwärmetauscher. Auch hier kann die Zuluft bereits durch den Wärmetauscher abgekühlt werden, so dass eine Reduktion des Volumenstroms nicht mehr sinnvoll ist. Allerdings ist bei Erdreichwärmetauschern grundsätzlich die Frage zu stellen, ob wegen des Kondenswasseranfalls und der damit verbundenen Gefahr der Verkeimung des Erdreichwärmetauschers diese Betriebsweise genutzt werden sollte.

Um die Aussagekraft der Messwerte der Luftqualitätsregelung in der Feldphase nicht durch zusätzliche Funktionen der Lüftungsanlage zu verringern, soll in den Prototypen die Sommerlüftung nicht umgesetzt werden.

### **3.1.5 Nutzerrückmeldung und -einflussmöglichkeiten**

Der Nutzer soll am Display der Lüftungsanlage die Möglichkeit bekommen, mehrere Betriebszustände auszuwählen. Neben den drei bei der Standardregelung vorhandenen Lüfterstufen 1 (Grundlüftung), 2 (Normallüftung) und 3 („Party-Stufe“) ist weiterhin die Auswahl der energie- und der komfortorientierten Luftqualitätsregelung als Betriebsweise möglich, wobei eine der beiden letzten Betriebsarten normalerweise während der Feldphase eingestellt werden sollte. Zu viele Schaltstufen überfordern den Nutzer und werden dann nicht genutzt. Sollte der Nutzer mit der Luftqualität nicht zufrieden sein, kann er die „Party-Taste“ drücken, die eine kurzfristige Erhöhung des Luftwechsels bewirkt. Möglich wäre eine automatische Auswertung dieser manuellen Erhöhungen des Luftwechsels. Da die Ursachen aber nicht bekannt sind, wird für die Feldphase auf diese Möglichkeit verzichtet. Aus den Informationen der Nutzerbefragungen während der Feldphase kann dann über die Sinnhaftigkeit einer solchen zusätzlichen Auswertung entschieden werden.

Der Nutzer soll über eine Anzeige im Wohnraum den aktuellen Betriebszustand der Lüftungsanlage rückgemeldet bekommen. Eine Rückmeldung der aktuellen Messwerte der VOC-Konzentration ist aber nicht geplant, da die Einzelwerte nur schwer interpretierbar sind und der Nutzer verunsichert werden könnte. Da bereits die Ergebnisse der DrD-Sequenzen zusammen mit dem bewerteten Fensteröffnungsverhalten angezeigt werden soll, können weitere Werte, die der Nutzer nicht einordnen kann, ihn überfordern. Es aus diesem Grund keine weitere Visualisierung der LuQaS-Messwerte geplant.

### **3.1.6 Einsatzgrenzen der Luftqualitätsregelung**

Der Einsatz der Luftqualitätsregelung kann an gewisse Grenzen stoßen, besonders, wenn die Lüftung in Gebäuden mit weiteren Funktionen kombiniert ist. Hier ist einerseits die Zu-

luftheizung zu nennen, da bei einer ausschließlichen Beheizung eines Gebäudes über die Zuluft der Volumenstrom in der Heizzeit nur begrenzt durch die luftqualitätsgeführte Volumenstromregelung reduziert werden kann. Dies schränkt die Nutzung der energieorientierten Betriebsweise ein oder erfordert einen erhöhten regelungstechnischen Aufwand, da die aktuelle Heizlast als zusätzliche Information in die Luftqualitätsregelung eingespeist und ausgewertet werden muss.

Ebenso muss beim Einsatz von Wärmepumpen-Kompaktaggregaten berücksichtigt werden, dass z. B. durch Abtauvorgänge die Zuluft von der Regelung der Wärmepumpe reduziert wird, wodurch Rückwirkungen auf die Entwicklung der VOC-Konzentrationen entstehen können. Sollte die Wärmepumpe auch im Sommer zur aktiven Kühlung des Gebäudes eingesetzt werden, reduziert dies während der Kühlphasen zusätzlich die Eingriffsmöglichkeiten der Luftqualitätsregelung.

Bei Passivhäusern liegt der projektierte Luftwechsel im Allgemeinen bereits recht niedrig, so dass der Spielraum für eine weitere Absenkung bei niedrigen VOC-Werten begrenzt ist, da nach DIN 1946-6 ein Mindestluftwechsel von  $0,3 \text{ h}^{-1}$  eingehalten werden muss.

Soll die komfortorientierte Betriebsweise in einem Gebäude ermöglicht werden, so sind ggf. beim Schallschutz erhöhte Anforderungen zu erfüllen. Damit die Nutzer bei erhöhtem Volumenstrom keinen störenden Geräuschen in den Schlafräumen ausgesetzt sind, sind das Kanalnetz und die Luftauslässe der Lüftungsanlage entsprechend auszulegen.

Da bei der Luftqualitätsregelung die Luftbalance zwischen Zu- und Abluft nicht verändert wird, sind hier keine Begrenzungen des Einsatzes bei vorhandenen Feuerstätten im Gebäude zu erwarten. Eine unzulässige Anreicherung von Kohlenmonoxid im Gebäude durch eine offene Feuerstätte könnte durch die Luftqualitätsregelung sogar erkannt werden. Da die Messwerte nicht kalibrierbar sind (nichtlineare Überlagerung unterschiedlicher Substanzen) kann der LuQaS-Sensor aber nach heutiger Einschätzung keine Sicherheitsfunktion beim Betrieb solcher Feuerstätten übernehmen.

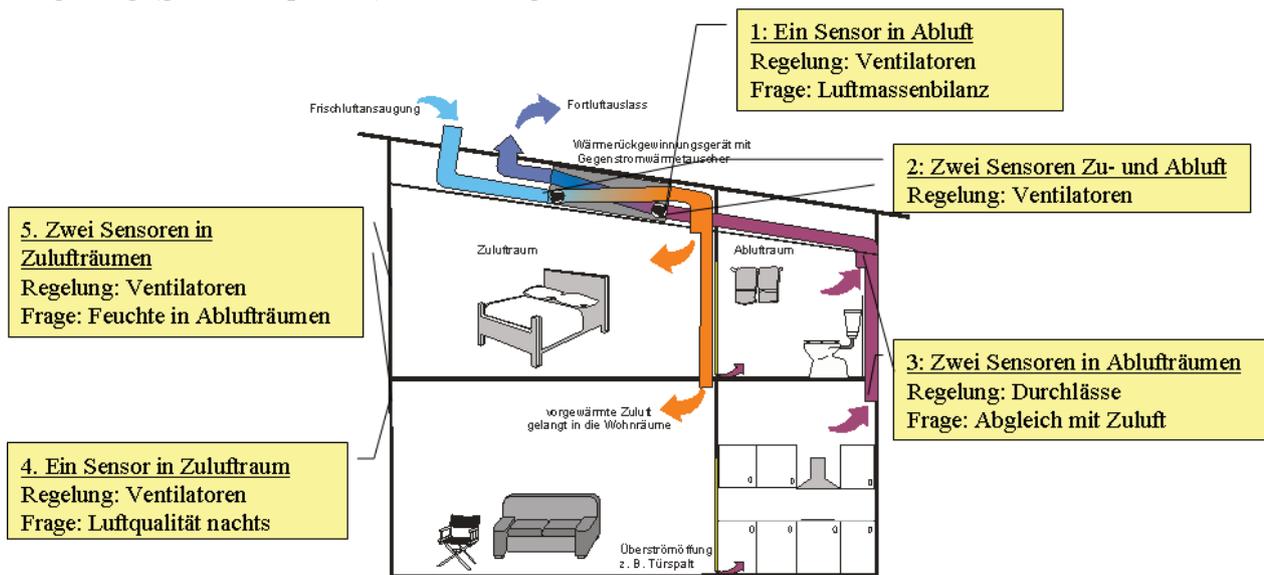
Trotz deutlicher Verbesserung gegenüber früheren Sensoren, muss auch beim LuQaS-Sensor berücksichtigt werden, dass dieser im Laufe der Jahre einer Alterung unterliegt und somit sich ein Drift bei den Messwerten einstellen kann. Dieser Drift kann bei der oben beschriebenen Luftqualitätsregelung mit dynamischer Berechnung der Sollwerte aber eliminiert werden, da immer die aktuellen Messwerte statistisch ausgewertet werden. Zusätzlich ist eine Grenze bei den Sollwerten sinnvoll, ab der eine Luftqualitätsregelung nicht mehr zuverlässig funktionieren kann, da der Sensor durch Drift oder Defekte am äußeren Rand seines Messbereichs von typischerweise 80 bis 254 Digits liegt. Der obere Sollwert sollte nicht über 220 Digits ansteigen, da darüber kaum eine sinnvolle Streuung der Messwerte zu erwarten ist. Die untere Grenze ist schwerer zu bestimmen, da keine Informationen über das Verhalten des Sensors im Bereich von ca. 85 Digits (Grundpegel) vorliegen.

Durch unterschiedlichen Drift zwischen Zu- und Abluftsensor kann weiterhin die Situation entstehen, dass die Kontrolle, ob die Qualität der Zuluft noch besser ist, als diejenige der Abluft, nicht mehr funktioniert. Wie wahrscheinlich eine solche Situation ist, kann zurzeit nicht abgeschätzt werden.

## 3.2 Platzierung der Sensoren

Die richtige Platzierung der Sensoren ist genau zu wählen, um ein optimales Verhältnis von (Kosten-)Aufwand und Nutzen zu erreichen. Dabei ist zwischen Abluftanlagen und Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung zu unterscheiden. Abluftanlagen werden im Folgenden nicht weiter betrachtet, da sie nicht Bestandteil des Forschungsprojekts sind.

Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung können durch die Luftqualitätsregelung eine Energieeinsparung beim Ventilatorstrom erzielen, durch die Wärmerückgewinnung ist die mögliche Reduktion bei der Heizenergie gering, grundsätzlich steht daher die Komfortsteigerung (gute Luftqualität) im Vordergrund.



**Abbildung 3.2-1: Mögliche Platzierungen der Luftqualitätssensoren**

Für die Frage, ob Verunreinigungen schnell und genau gemessen werden können, ist die Platzierung der Sensoren entscheidend (Abbildung 3.2-1).

### Ein Sensor in Abluft

Bei der einfachsten Variante der Luftqualitätsregelung wird nur ein Sensor in der Abluft der Lüftungsanlage platziert. Geregelt werden Zu- und Abluftventilator. Die Frage der Luftmassenbilanz muss hier wie in allen Fällen bei Zu- und Abluftanlagen geklärt werden.

### Luftqualität

Der Sensor misst einen Mittelwert der Luftqualität der einzelnen Räume. Verunreinigungen einzelner Räume kommen verdünnt und gedämpft am Fühler an. Bei Zulufräumer ist die Zeitverzögerung größer als bei Ablufräumer, bei den Messungen in Passivhäusern konnte dies jedoch kaum festgestellt werden. Die Messwerte lassen den Schluss zu, dass die Änderungen des Sensorsignals groß genug sind, um eine Regelung zu realisieren.

### Maximale Feuchte in den Ablufträumen

Eine maximale Feuchte in den Ablufträumen kann nur bedingt eingehalten werden, da Abluft ein Gemisch aus allen Ablufträumen ist. Grundsätzlich muss ein solcher Sollwert abhängig von der Jahreszeit modifiziert werden.

### Sommerliche Temperaturen

Da die Außentemperatur nicht bekannt ist, kann Nachtlüftung und Minimierung des Luftvolumenstroms bei Anstieg der Außen- über die Raumtemperatur nur erfolgen, wenn das Lüftungsgerät zusätzliche Temperaturfühler bereitstellt.

### Sollwert

Ist nur ein Sensor in der Abluft vorhanden, kann entweder ein Absolutwert für die Luftqualität von den Bewohnern vorgegeben werden oder er wird in einer Testsequenz ermittelt.

### **Ein Sensor in Abluft und ein Sensor in Zuluft**

Neben einem Sensor in der Abluft wird ein zusätzlicher Sensor in der Zuluft platziert. Damit wird die Außenluftqualität gemessen sowie die Außenluftfeuchte und Außenlufttemperatur bei einem Tripel-Sensor (VOC, Temperatur und Feuchte) mit erfasst. Geregelt werden Zu- und Abluftventilator.

### Luftqualität

Der Ablufsensor misst wie oben einen Mittelwert der Luftqualität der einzelnen Räume mit allen aufgeführten Konsequenzen. Da die Qualität der Außenluft bekannt ist, kann auf die Differenz zwischen Außen- und Raumluft reagiert werden. Insbesondere bei deutlichen Schwankungen der VOC-Konzentration in der Außenluft ist dies erforderlich. Da die Wahrnehmung der Luftqualität in Abhängigkeit von der Außenluft geschieht, ist es sinnvoll, dies in der Regelung zu berücksichtigen.

### Maximale Feuchte in den Ablufträumen

Hier ergibt sich die gleiche Situation wie bei der Variante mit nur einem Sensor in der Abluft - siehe oben. Der Messwert in der Zuluft ist nicht gleichbedeutend mit einer Außenluftmessung, so dass hier auch keine Daten zur Außenluftfeuchte vorliegen (Einfluss haben z. B. die Wärmerückgewinnung, ein Erdreichwärmetauscher, Wärmeeinträge der Leitungen und des Lüftungsgerätes).

### Sommerliche Temperaturen

Auch hier liegen keine Informationen zur Außentemperatur vor (siehe oben).

### Zwei Sensoren in Ablufträumen

Die Sensoren werden in den zwei wichtigsten Ablufträumen platziert (z. B. Küche und Bad). Es wird davon ausgegangen, dass diese der Zuluft aus dem Wohnräumen zugeordnet sind. Geregelt werden die Abluftdurchlässe durch automatische Veränderung der Durchlassöffnung. Diese Variante ist besonders bei Abluftanlagen von Interesse.

### Luftqualität

Verunreinigungen in den Ablufträumen werden sofort festgestellt. Es werden deutliche Veränderungen des Sensorsignals erwartet.

Verunreinigungen in Zulufräumen werden mit einer Zeitverzögerung und Verdünnung festgestellt. Diese ist jedoch geringer als in den oben beschriebenen Varianten, da geschossweise gemessen und geregelt werden kann (Schlafräume - Bad und Wohnräume - Küche).

Veränderungen der Außenluftqualität können nicht berücksichtigt werden.

### Maximale Feuchte in den Ablufträumen

Die maximale Feuchte kann in den mit Sensoren ausgestatteten Räumen sehr gut sichergestellt werden, wobei der Sollwert abhängig von der Jahreszeit modifiziert werden muss.

### Sommerliche Temperaturen

Eine Sommerregelung ist nicht möglich, da Außentemperatur nicht bekannt ist.

### Problem

Der Abluftventilator muss auf eine konstante Druckdifferenz geregelt werden. Der Zuluftventilator muss abhängig von der Klappenstellung der Abluftventile geregelt werden, damit die Luftmassenbilanz erhalten bleibt.

### Variante: Getrennte Regelung von zwei Abluftsträngen

Üblicherweise gibt es mehr als zwei Ablufträume (Gäste-WC; zweites Bad). Um auch auf Feuchte oder Verunreinigungslasten in diesen Räumen reagieren zu können, kann es sinnvoller sein, die Sensoren in die Abluftstränge aus mehreren Ablufträumen anzubringen. Dabei ist sicher eine geschossweise Aufteilung sinnvoll. Die Volumenstromregelung erfolgt dabei über motorisch betriebene Klappen je Abluftstrang.

Die Verunreinigungen in einzelnen Ablufträumen kommen in diesem Fall verdünnt mit der Abluft aus den anderen Ablufträumen am Sensor an. Der Verdünnungsgrad hängt vom Volumenstromverhältnis der einzelnen Räume ab.

Eine maximale Feuchte kann aufgrund der Verdünnung auch nicht in gleichem Maß gehalten werden wie bei der Platzierung der Sensoren im Raum.

Die Frage der Regelung der Ventilatoren und der Luftbilanz besteht wie oben.

### Zwei Sensoren in Zulufräumen

Es werden ein Sensor im Wohnraum und ein Sensor in einem Schlafrum platziert. Die Regelung des Zuluftventilators erfolgt so, dass die Sollwerte der beiden Sensoren immer eingehalten bzw. unterschritten werden. Der Abluftventilator muss entsprechend angepasst werden, damit die Luftmassenbilanz erhalten bleibt.

### Luftqualität

Verunreinigungen in den Zulufräumen mit Sensoren werden sofort festgestellt. Es können deutliche Veränderungen des Sensorsignals gemessen werden. Verunreinigungen in Zulufräumen ohne Sensoren können nicht festgestellt werden. Das Gleiche gilt für Verunreinigungen (z. B. Toilettenbenutzung) in den Ablufträumen. Aus dem Grund muss in diesem Modell auf jeden Fall ein Mindestvolumenstrom sichergestellt werden, der die gerichtete Gebäudedurchströmung gewährleistet.

### Maximale Feuchte in den Ablufträumen

Die Feuchte in den Ablufträumen kann nicht auf einen Maximalwert begrenzt werden.

### Sommerliche Temperaturen

Eine Sommerregelung ist nicht möglich, da die Außentemperatur nicht bekannt ist.

### **Variante1: Mobile Sensoren**

Werden die Sensoren mit Funkeinheiten ausgestattet, so könnten die Nutzer den Sensor immer in den aktuellen Aufenthaltsräumen platzieren, in denen die höchste Aktivität bzw. VOC-Last auftritt. Kleine Ladestationen in jedem Zimmer könnten die Sensoren aufnehmen und mit Energie versorgen.

Bei dieser Variante müssen die Nutzer aktiv mitwirken, da sich sonst evtl. ungünstigere VOC-Werte einstellen können, wenn der Fühler z. B. nachts im unbenutzten Wohnzimmer vergessen wird. Außerdem sind solche mobilen LuQaS-Sensoren zurzeit nicht am Markt verfügbar, sondern müssten noch entwickelt werden.

### **Variante2: getrennte Regelung des Zuluftvolumenstroms je Bereich (Wohnen, Schlafen).**

Um den Zuluftvolumenstrom zu minimieren und damit den Energieaufwand für den Lufttransport und die Luftkonditionierung, wäre es wünschenswert, den Zuluftvolumenstrom für jeden Bereich gesondert entsprechend dem Sensorsignal zu regeln. Dazu müssten je Strang eine automatische Volumenstromregelung vorgesehen werden. Denkbar ist eine motorische Klappe bzw. ein Ventilator je Strang mit entsprechend kleinerer Leistung.

Auch hier muss die Frage der Luftmassenbilanz geklärt werden.

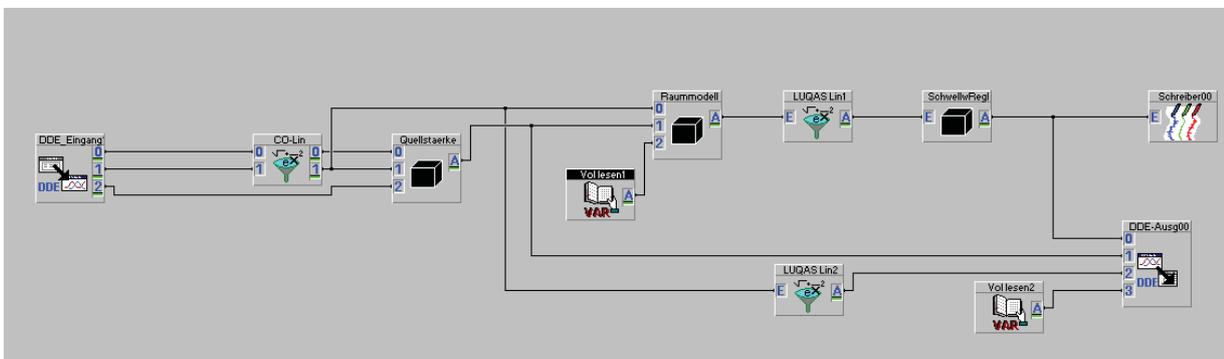
## **Fazit**

In den Prototypen der Luftqualitätsregelung sollen die LuQaS-Sensoren in Zu- und Abluft in der Lüftungsanlage integriert werden. Dadurch können alle Räume, wenn auch verdünnt und zeitverzögert, überwacht werden, und eine Reaktion auf die Außenluftqualität ist ebenfalls möglich. Außerdem wird ein Aufwand für Zusatzverkabelung oder Stellmotoren vermieden. Die Kosten für Installation und Sensoren sind gering. Zur Kontrolle der Messwerte in der Abluft werden in jedem Gebäude des Feldtests zusätzlich 8 Sensoren in den Zu- und Ablufträumen montiert und kontinuierlich erfasst. Die Erprobung in Gebäuden mit Abluftanlagen ist vorerst nicht vorgesehen.

## **3.3 Rechnerische Simulation**

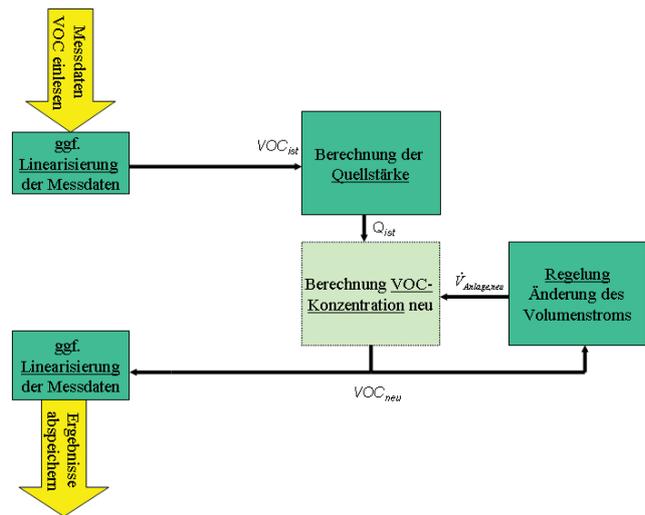
### **3.3.1 Modellbildung**

Um im Vorfeld des Baus der Prototypen von Lüftungsanlagen mit Luftqualitätsregelung Konzepte zur Regelstrategie entwickeln zu können, wurden mit der Messdatenerfassungs- und Regelungssoftware DasyLab das Gebäude als 1-Zonen-Modell, d. h. unter Annahme idealer Durchmischung der Stoffkonzentrationen im Gebäude, erstellt und unterschiedliche Regelstrategien implementiert. Damit sollten die Auswirkungen der Regelstrategien und –parameter auf Basis der Messdaten aus dem Reihenendhaus in Passivhausbauweise (siehe Kapitel 2.1) simuliert werden. Die Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln erläutert. Abbildung 3.3-1 zeigt beispielhaft ein solches Modell mit den Ein- und Ausgabeschnittstellen.



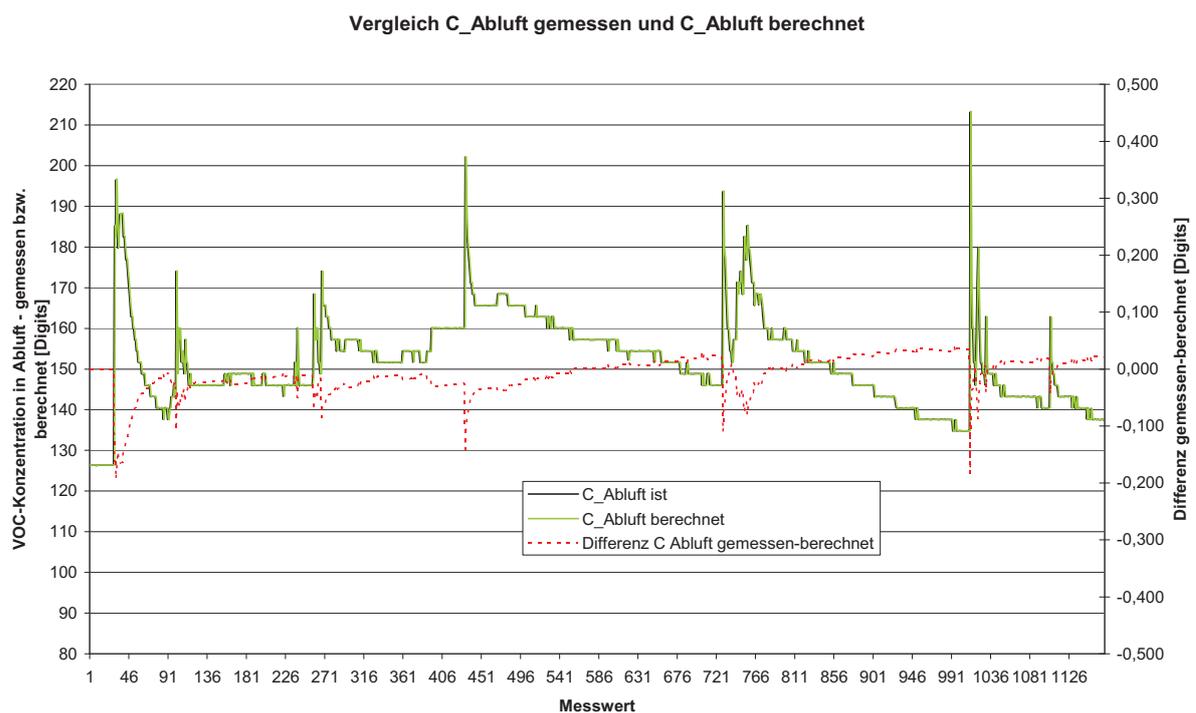
**Abbildung 3.3-1: Beispielschaltbild des DasyLab-Modells für die Schwellwertregelung**

In einem ersten Schritt wurde zur Überprüfung des Modells ein Vergleich der gemessenen VOC-Konzentrationen in der Abluft (als Mittelwert des Gebäudes) und der mit DasyLab berechneten VOC-Konzentrationen durchgeführt. Die Berechnung erfolgte in der Art, dass aus den gemessenen Zu- und Abluftkonzentrationen sowie dem Volumenstrom die Quellstärke berechnet wurde. Mit dieser Quellstärke und der gemessenen Zuluftkonzentration wurde die Abluftkonzentration berechnet (Abbildung 3.3-2).



**Abbildung 3.3-2: Vereinfachtes Blockschaubild des Berechnungsvorgangs zur VOC-Berechnung**

Die zeitliche Auflösung beträgt analog den LuQaS-Messdaten eine Minute. Die folgende Abbildung 3.3-3 zeigt den Vergleich zwischen gemessener und berechneter Abluftkonzentration.

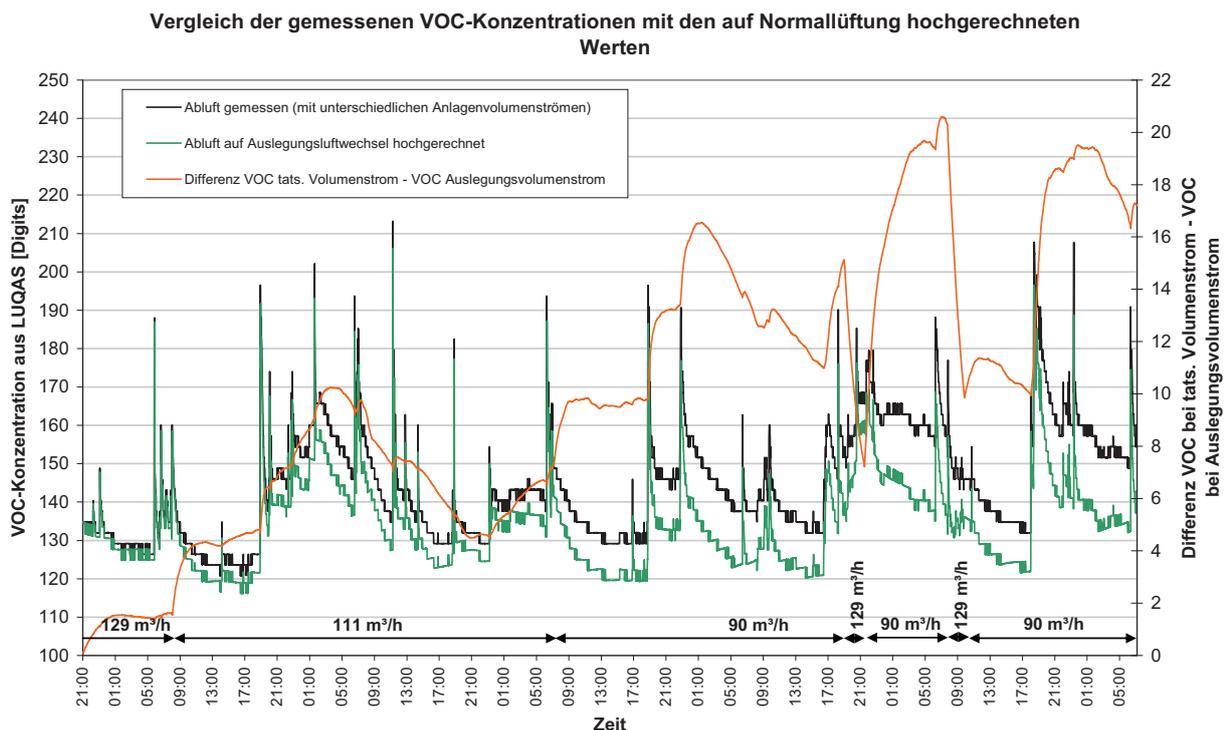


**Abbildung 3.3-3: Vergleich der gemessenen und der berechneten VOC-Abluftkonzentration**

Die Differenz zwischen Messwert und berechnetem Wert ist sehr gering und liegt bei +/- 0,2 Digits. Es ist somit mit Hilfe dieses Modells über Quellstärken möglich die gemessene Abluftkonzentration in einem Gebäude nachzuvollziehen.

Im nächsten Schritt wurde aus den Messdaten für die VOC-Konzentration in Zu- und Abluft und dem eingestellten Volumenstrom die Quellstärke der VOC-Last berechnet und danach mit dem Auslegungsvolumenstrom der Lüftungsanlage (Lüfterstufe 5, 135 m<sup>3</sup>/h) eine theoretische VOC-Konzentration rückgerechnet, die sich eingestellt hätte, wenn die Lüftung kontinuierlich im Auslegungszustand betrieben worden wäre und auch keine Verschmutzung der Filter vorgelegen hätte. Die so bestimmten Werte bildeten den Normaldatensatz, mit dem alle folgenden Berechnungen zur Reaktion der Lüftungsanlage durchgeführt wurden. Abbildung 3.3-4 zeigt den Vergleich der gemessenen VOC-Werte in der Abluft zu den Werten bei Normallüftung, die Differenz der beiden Werte und den während der Messphase eingestellten Volumenstrom. Je niedriger der Volumenstrom während der Messung war, desto höher ist die Differenz zwischen gemessenem Wert und berechneter Normallüftung.

Mit dem Auslegungsluftwechsel würde sich der VOC-Wert in der Abluft im Mittel um 10,1 Digits während des gesamten Zeitraums verringern. Der Abstand der beiden dargestellten Kurven schwankt in Abhängigkeit der Aktivitäten im Gebäude, d. h. er sinkt bei geringen Quellstärken und steigt bei vermehrten Aktivitäten im Haus an, da über den erhöhten Volumenstrom mehr VOC abtransportiert werden könnte.



**Abbildung 3.3-4: Gemessene VOC-Konzentration der Abluft und auf Normallüftung umgerechnete Werte**

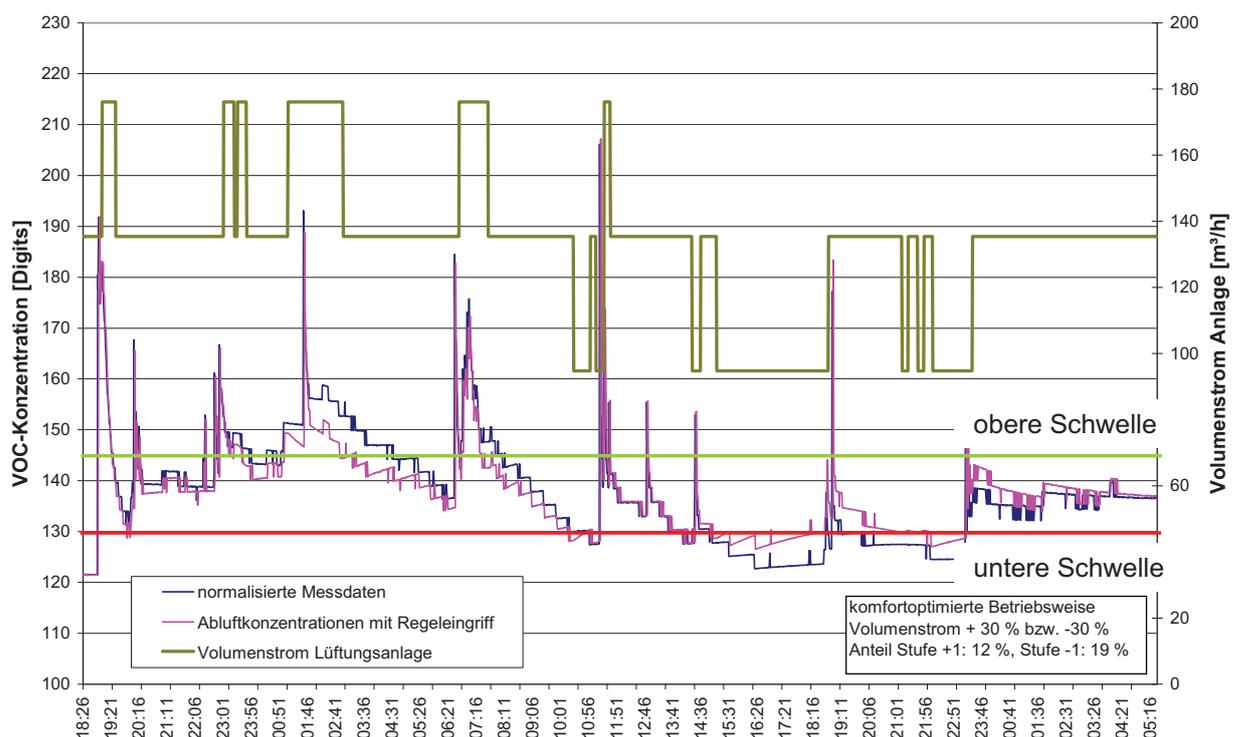
Die „Täler“ mit niedrigen VOC-Konzentrationen liegen im neu berechneten Datensatz bei Abwesenheit von Personen auf gleichem Niveau und die VOC-Spitzen sind ein wenig vermindert. Trotzdem sind die typischen Profile im Tagesgang noch gut zu erkennen, so dass durch die Normalisierung der Messwerte die grundsätzliche Aussage der Eignung der Abluft als Informationsquelle nicht eingeschränkt wird.

### 3.3.2 Ergebnisse bei der Schwellwertregelung

Als erstes Regelkonzept wurde die Schwellwertregelung in DasyLab abgebildet. Kern dieser Regelstrategie bilden zwei Schaltpunkte, bei deren Über- oder Unterschreitung der Volumenstrom der Lüftungsanlage des Gebäudes verändert wird.

Es wurden weiterhin zwei verschiedene Betriebsweisen unterschieden. Bei der „energieorientierten“ Betriebsweise wird in Zeiten mit niedrigen VOC-Konzentrationen die Luftförderung reduziert und so den Stromverbrauch der Anlage vermindert. Dies geschieht in zwei Schritten. Die „komfortorientierte“ Betriebsweise versucht auftretende Spitzen der VOC-Konzentrationen durch einen erhöhten Volumenstrom zu reduzieren. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, in Zeiten niedriger Konzentration ebenfalls den Volumenstrom zu reduzieren.

Mit dem normierten Datensatz wurden die Berechnungen für komfortorientierte und energieorientierte Betriebsweise und unterschiedliche Schaltschwellen zwischen 125 und 160 Digits durchgeführt. Der Volumenstrom wird ausgehend vom Auslegungsvolumenstrom im untersuchten Gebäude um unterschiedliche Prozentsätze des Auslegungsvolumenstromes variiert (meist  $\pm 30\%$ ). Bei energieorientierter Betriebsweise wird die niedrigste Lüftungsstufe auf 60 % des Auslegungsvolumenstromes festgelegt. Die Schwelle muss mindestens 5 (10) Samples (Minuten) unter- bzw. überschritten sein, damit die Regelung den Volumenstrom der Anlage ändert.

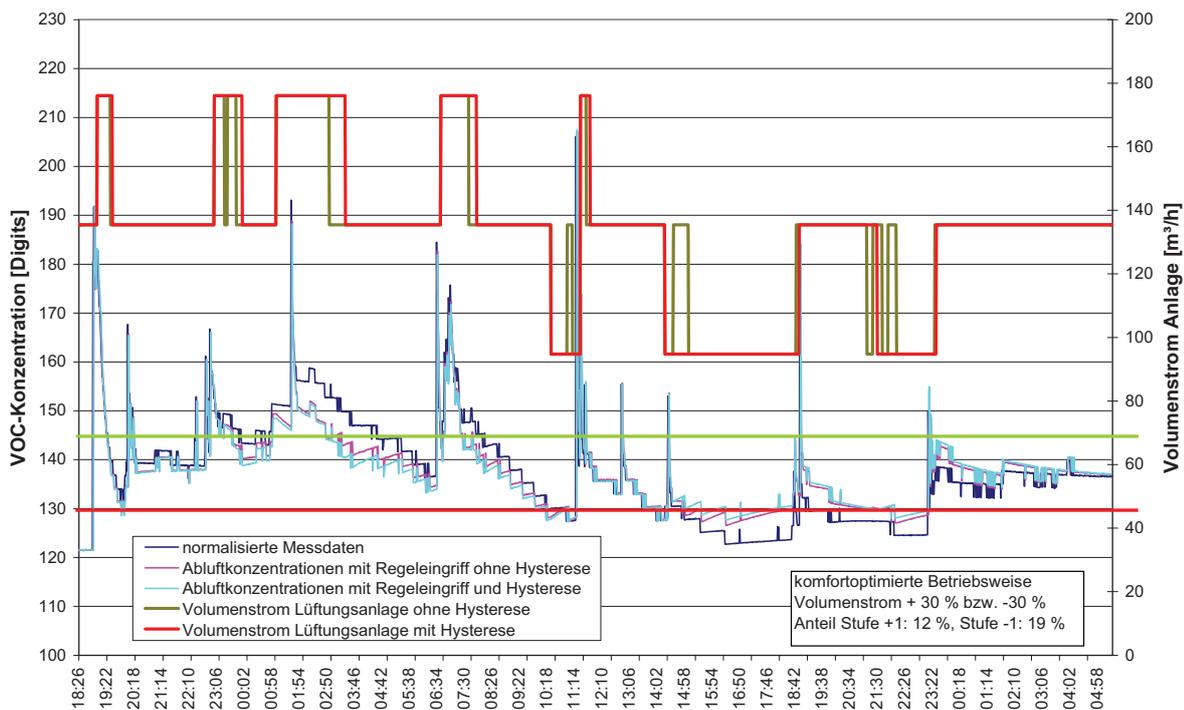


**Abbildung 3.3-5: VOC-Konzentration mit und ohne Regeleingriff bei komfortorientierter Betriebsweise**

Als erstes Ergebnis ist in Abbildung 3.3-5 die komfortorientierte Betriebsweise dargestellt. Der ausgewählte Ausschnitt aus den Messdaten repräsentiert einen Zeitraum mit vielen Wechseln in der Belegung des Gebäudes und somit viel Dynamik bei den Messwerten. Ande-

re Zeiträume haben VOC-Verläufe mit ausgeprägten Tagesprofilen, so dass der hier gezeigte Zeitraum ungünstige Randbedingungen für die Luftqualitätsregelung repräsentiert.

Abbildung 3.3-5 zeigt den gemessenen Verlauf der VOC-Abluftkonzentration (schwarze Linie) und die Konzentration bei komfortorientierter Betriebsweise mit Schaltschwellen bei 145 und 130 Digits (violette Linie). Gleichzeitig ist der Volumenstrom der Zu-/Abluft dargestellt (Normallüftung in diesem Beispiel 135 m<sup>3</sup>/h, erhöhte Lüftung 30 % mehr = 175 m<sup>3</sup>/h, verminderte Lüftung 30 % weniger = 94 m<sup>3</sup>/h). Durch den zeitweise erhöhten Volumenstrom werden VOC-Konzentrationen über 145 abgesenkt, bei Konzentrationen unter 130 werden die VOC-Pegel tendenziell erhöht. Die erhöhte Stufe wurde im gezeigten Ausschnitt in 12 % der Zeit erreicht, unterhalb der unteren Schwelle liegen 19 % der Zeit. Auch wenn hier die optimalen Schaltpunkte sicher noch nicht gefunden sind, zeigt sich bereits, dass diese Regelstrategie tatsächlich zu einer Komforterhöhung (Verringerung hoher Messwerte) beitragen kann. Die Betriebsweise der Lüftungsanlage ist jedoch durch einen häufigen Wechsel des Volumenstroms – teilweise innerhalb kurzer Zeitintervalle – gekennzeichnet.



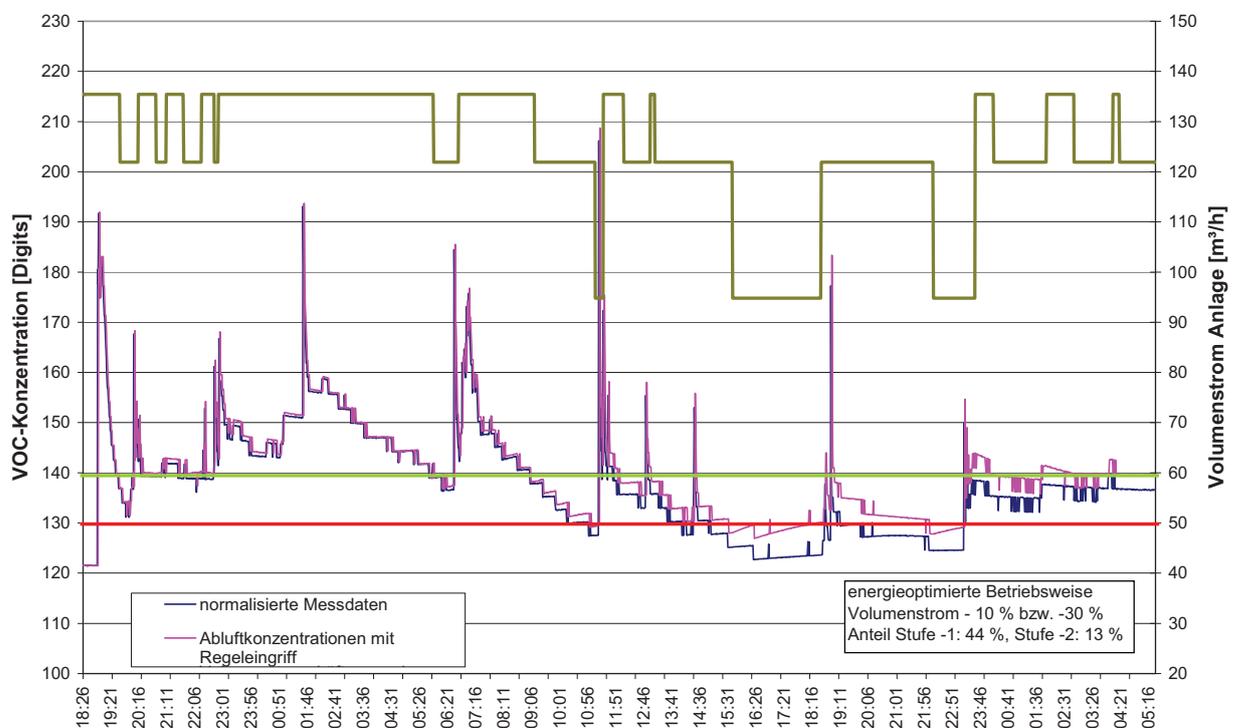
**Abbildung 3.3-6: Einfluss einer Hysterese auf die VOC-Konzentration und den Anlagevolumenstrom**

In Abbildung 3.3-6 sind für die komfortorientierte Betriebsweise die VOC-Konzentrationen mit und ohne Hysterese (3 Digits Unterschreitung oberer Sollwert und 3 Digits Überschreitung unterer Sollwert) dargestellt. Grundsätzlich verzögert eine Hysterese die Reaktion der Lüftungsanlage, so dass der VOC-Last weniger exakt nachgefahren werden kann. Gleichzeitig reduziert sie aber auch die Häufigkeit von kurzen Volumenstromwechseln der Lüftungsanlage und trägt somit deutlich zu einem gleichmäßigeren Betrieb bei. Im gezeigten Beispiel treten keine sehr kurzen Volumenstromwechsel mehr auf. Der zum Vergleich ebenfalls darge-

stellte Verlauf ohne Hysterese ist durch häufigere kurze Volumenstromwechsel gekennzeichnet, die den Nutzer ggf. stören könnten.

Eine Schalthysterese sollte in den Prototypen auf alle Fälle realisiert werden, in den folgenden Betrachtungen ist sie aus Gründen der Vergleichbarkeit und zur besseren Beurteilung bestimmter Parameterkombinationen nicht berücksichtigt.

Bei energieorientierter Betriebsweise und Schaltschwellen von 140 und 130 Digits ergeben sich die in der folgenden Abbildung 3.3-7 dargestellten Ergebnisse. Die erste abgesenkte Stufe (Volumenstrom um 10 % reduziert) wird in 44 % der Messpunkte erreicht. Bei dem hier simulierten Ausschnitt der Messwerte wurde die niedrigste Stufe (Volumenstrom um 30 % reduziert) in 13 % der Fälle erreicht. Der mittlere Volumenstrom in diesem Beispiel lag bei 124 m<sup>3</sup>/h und konnte gegenüber dem Auslegungsvolumenstrom von 135 m<sup>3</sup>/h um 9 % reduziert werden.

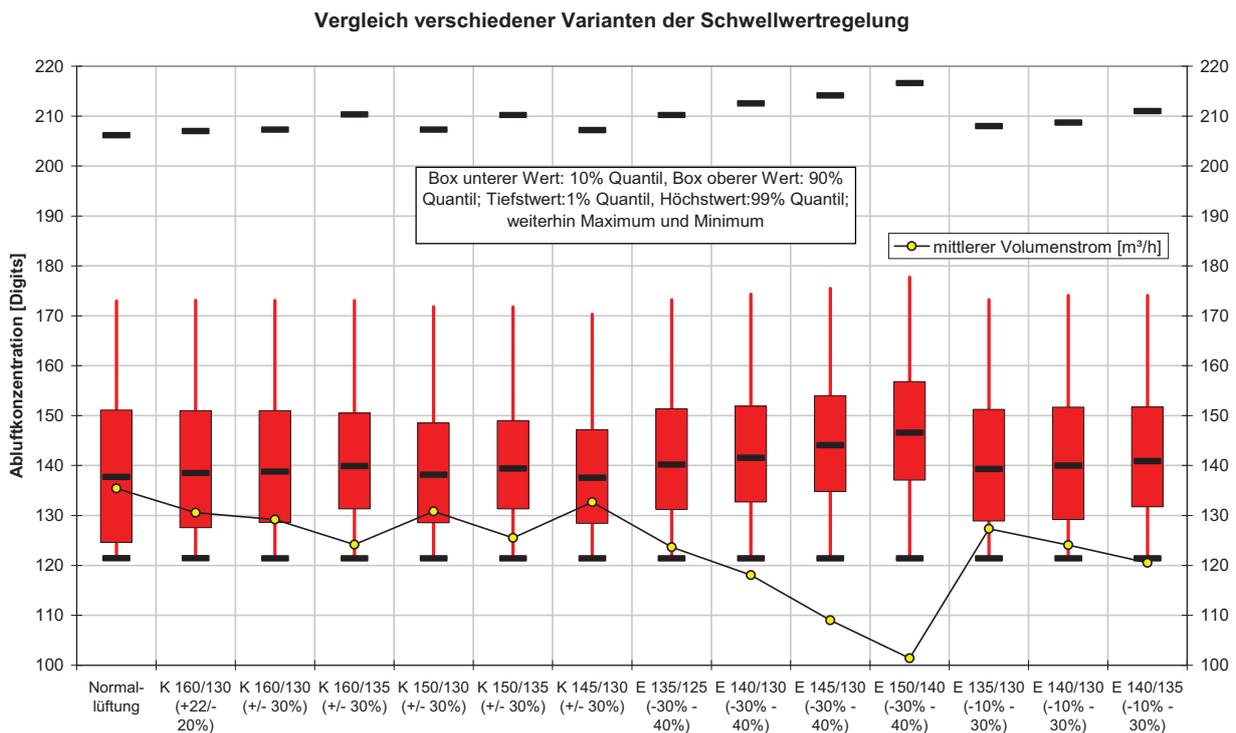


**Abbildung 3.3-7: Vergleich Messdaten und energieorientierter Betriebsweise**

In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Schwellwertregelung mit verschiedenen Schwellwerten und Volumenströmen dargestellt. Die linke Säule zeigt immer die Normallüftung ohne Luftqualitätsregelung als Vergleich. Danach folgen Varianten mit komfortorientierter Betriebsweise (grün hinterlegt und mit „K“ als Bezeichnung) und Varianten mit energieorientierter Betriebsweise (rot hinterlegt und mit „E“ als Bezeichnung).

Abbildung 3.3-8 zeigt die statistische Auswertung der sich ergebenden VOC-Werte der Varianten. In jeder Spalte werden insgesamt 8 Werte dargestellt. Von unten sind dies: absolutes Minimum aller Werte (unterer horizontaler Strich), 1 %- Quantil (Ende unterer roter Strich),

10 %- Quantil (untere Begrenzung Box), Median (horizontale Linie in der Box), 90 %-Quantil (obere Begrenzung Box), 99 %- Quantil (Ende oberer roter Strich), absolutes Maximum (oberer horizontaler Strich) sowie Mittelwert des Volumenstromes als Linie mit Bezug auf die rechte Ordinate (Y-Achse). Unter der Abszisse (X-Achse) steht als Kennung der Variante erst K(omfortorientierte) oder E(nergieorientierte) Betriebsweise, dann die obere und untere Schaltschwelle und in der nächsten Zeile die Veränderung des Volumenstroms, die bei der entsprechenden Schaltschwelle eingestellt wird. Ganz links im Diagramm ist zum Vergleich die Auswertung mit Normallüftung dargestellt, danach folgen sechs komfortorientiert Varianten und schließlich sieben Varianten mit energieorientierter Betriebsweise.

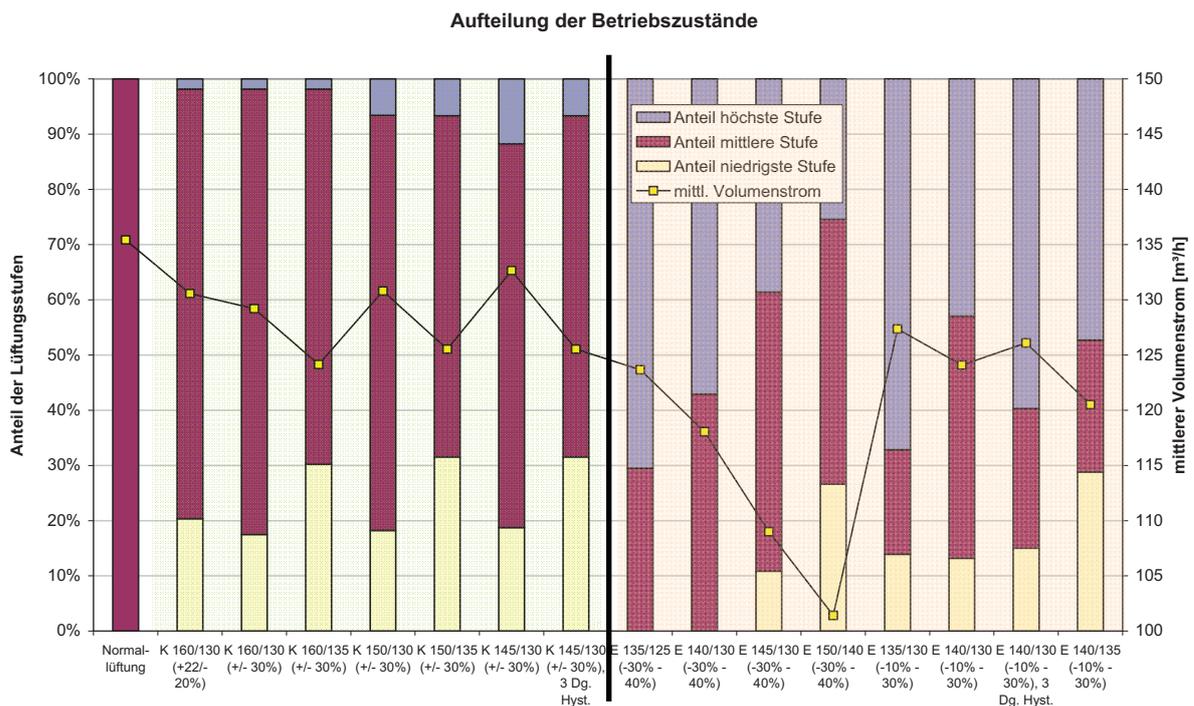


**Abbildung 3.3-8: Vergleich unterschiedlicher Varianten der Schwellwertregelung**

Die Varianten zur komfortorientierten Betriebsweise unterscheiden sich hinsichtlich der Schaltschwellen und der prozentualen Veränderung des Volumenstroms. Wird die untere Schwelle von 130 auf 135 Digits angehoben, so ändert sich das 10 %-Quantil um ca. 4 Digits nach oben, der Median stieg leicht an und das absolute Maximum erhöht sich leicht, da Spitzen meist nach Phasen des Absenkbetriebes auftreten und bei gleicher Quellstärke die VOC-Konzentration bei geringerem Volumenstrom höher ausfällt. Gleichzeitig sinkt der mittlere Volumenstrom ab.

Eine Reduktion der oberen Schwelle von 160 auf 150 Digits führt zu einer Verminderung des 90 %-Quantils um ca. 3 Digits, alle anderen Kennwerte bleiben nahezu unverändert. Bei unterschiedlichen Kombinationen von unterem und oberem Schwellwert ergeben sich aber bei den untersuchten Varianten immer tendenziell eine leichte Verminderung des mittleren Volumenstroms, so dass die komfortorientierte Betriebsweise in den hier untersuchten Ausprägungen nicht zu einem Mehrverbrauch bei Lüfterstrom oder Heizwärme führt.

Bei energieorientierter Betriebsweise führt eine Erhöhung der Schaltschwellen zu einer Reduktion des mittleren Volumenstroms, die Häufigkeitsverteilung der VOC-Werte verschiebt sich dadurch aber zu höheren Werten. In der Variante mit dem geringsten Volumenstrom kann dieser um ca. 25 % reduziert werden. Die VOC-Werte steigen dabei zwangsläufig an, hauptsächlich während der Absenkezeiten (bei Personenabwesenheit), aber auch nach Absenkezeiten beim Auftreten von Spitzen. Dieser Anstieg liegt bei den untersuchten Varianten im Bereich von maximal 5 Digits. Wählt man eine Kombination von Schwellwerten mit höherem mittleren Volumenstrom, so ergeben sich bei 12 % Reduktion des Volumenstroms kaum Veränderungen in der Verteilung der VOC-Werte.



**Abbildung 3.3-9: Vergleich der Betriebszeiten der Lüftungsstufen**

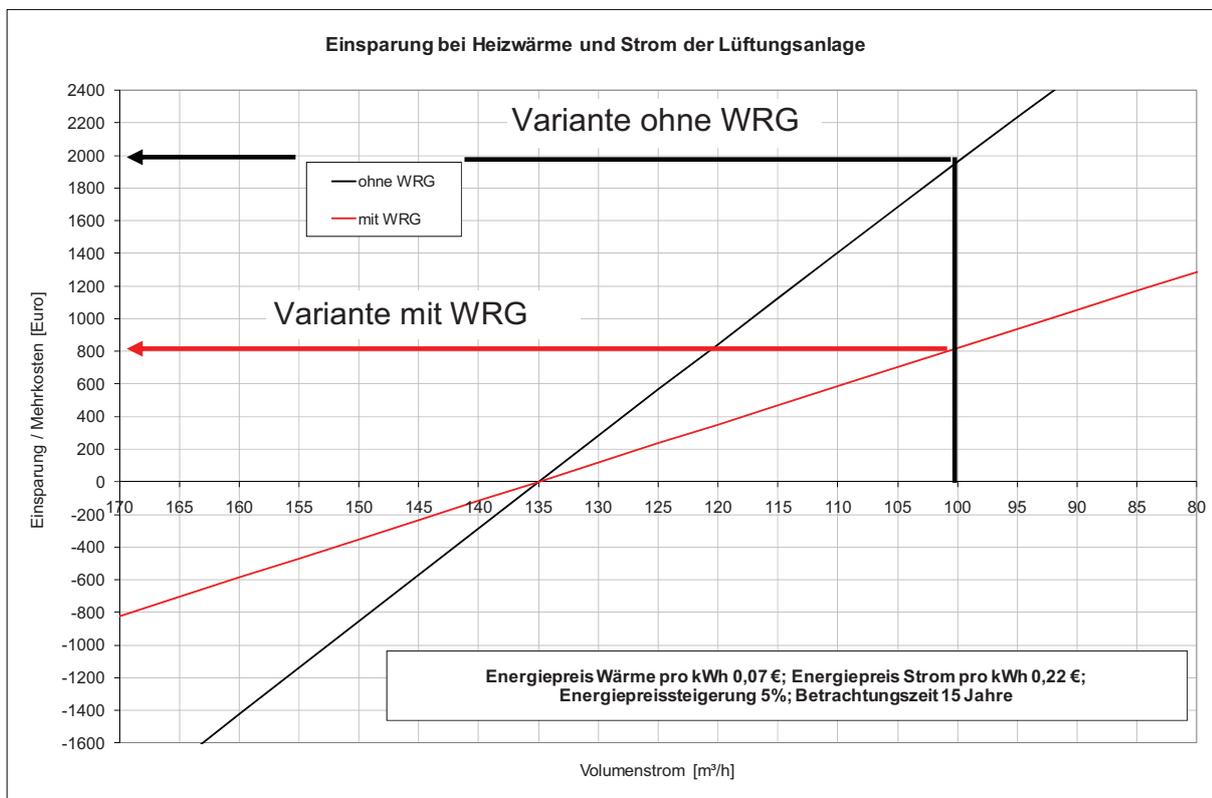
Abbildung 3.3-9 zeigt die Betriebszeiten der einzelnen Lüfterstufen und den mittleren Volumenstrom. Bei komfortorientierter Betriebsweise wird die erhöhte Lüftung nur in nennenswerter Anzahl erreicht, wenn der obere Schwellwert niedrig gewählt wird. Die abgesenkte Lüftungsstufe wird bei allen untersuchten Varianten in mindestens 20 % der Zeit erreicht, wodurch die erhöhte Luftförderung kompensiert werden kann. Die mittlere Stufe entspricht hier der Normallüftung.

Bei der energieorientierten Betriebsweise entspricht die höchste Stufe der Normallüftung. Hier kann es bei ungünstiger Wahl der Schaltschwellen passieren, dass die zweite Stufe der Reduktion des Volumenstroms nicht erreicht wird, da der zweite Schwellwert so niedrig liegt, dass durch die Absenkung der ersten Stufe dieser Wert nicht mehr erreicht werden kann (ggf. nur noch durch längere Abwesenheit der Bewohner, z. B. in Urlaubszeiten). Aber auch mit dieser 2-Punkt-Regelung kann der Volumenstrom nennenswert gesenkt und somit Energie gespart werden. Die größte Reduktion des Volumenstroms stellt sich bei Schaltschwellen ein, bei denen die Lüftungsanlage nur noch ca. ein Viertel der Zeit im Auslegungszustand betrieben wird. Hier scheinen die sinnvollen Grenzen bei den Schwellwerten überschritten zu sein.

Die dargestellten Veränderungen des mittleren Volumenstroms der Lüftungsanlage haben einerseits Auswirkungen auf den Stromverbrauch der Lüftungsanlage, andererseits wird durch einen veränderten Volumenstrom auch der Lüftungswärmeverlust beeinflusst. Da die betrachteten Lüftungsanlagen eine hocheffiziente Wärmerückgewinnung besitzen, werden die energetischen Auswirkungen aber stark abgemildert.

Abbildung 3.3-10 zeigt eine Abschätzung der monetären Auswirkungen der Veränderungen des Luftwechsels ausgehend von einem Referenzgebäude mit 135 m<sup>3</sup>/h Auslegungsvolumenstrom. Gelingt es, mit der Luftqualitätsregelung den mittleren Volumenstrom deutlich unter den Ausgangswert von 135 m<sup>3</sup>/h zu senken, so steigen die Einsparungen bei den Heizkosten an. Sie setzen sich zusammen aus den geringeren Stromkosten und den Einsparungen bei der Heizwärme.

Wird die bereits gezeigte Variante der energieorientierten Betriebsweise mit dem geringsten mittleren Volumenstrom eingesetzt (101 m<sup>3</sup>/h), so belaufen sich die Einsparungen bei der Heizwärme auf ca. 1,5 kWh/(m<sup>2</sup>a). Dies entspricht einer Reduktion des Heizwärmeverbrauchs um ca. 12 %. Wegen den bereits sehr geringen Heizkosten in Passivhäusern fallen die Kostenreduktionen entsprechend gering aus. Deutlich interessanter wird die energieorientierte Betriebsweise beim Einsatz in Gebäuden mit Abluftanlagen. Hier wären Kostenreduktionen von über 130 € pro Jahr bzw. 1960 € in 15 Jahren möglich.



**Abbildung 3.3-10: Darstellung der Veränderung der Energiekosten bei unterschiedlichen Volumenströmen**

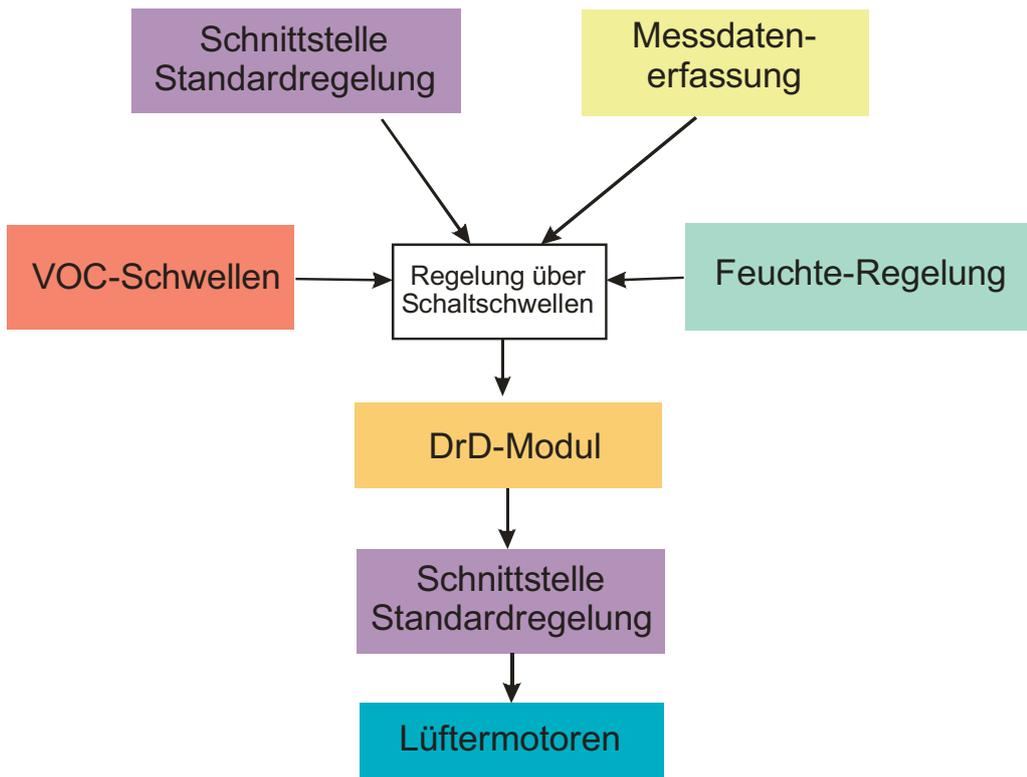
Die Auswertungen zeigen, dass mit der energie- und der komfortorientierten Betriebsweise Energie und Kosten gespart werden können. Bei Gebäuden mit Abluftanlagen sind die mögli-

chen Einsparungen naturgemäß deutlich höher. Auch die komfortorientierte Betriebsweise führt bei den untersuchten Varianten zu einer leichten Reduktion der Energiekosten bei gleichzeitiger Verbesserung der Luftqualität bei großen VOC-Quellen im Gebäude. Den Energiekosteneinsparungen stehen aber die Kosten der Sensoren gegenüber. Zurzeit steht aus diesem Grund bei der Luftqualitätsregelung noch die Komfortverbesserung im Vordergrund, bei sinkenden Preisen bei Luftqualitätssensoren kann aber auch die energieorientierte Betriebsweise finanziell interessanter werden.

### **3.3.3 Fazit Luftqualitätsregelung**

Mit der Schwellwertreglung ergibt sich nach den bisherigen Untersuchungen der gewünschte Effekt der Reduktion der VOC-Werte im Gebäude bzw. eine Energieeinsparung. Die Energieeinsparung bei energieorientierter Betriebsweise hängt bei Gebäuden mit Wärmerückgewinnung von der Wahl der Schaltschwellen ab; je höher die Schwellwerte, desto höher fällt die Einsparung aus. Umgekehrt kann die Luftqualität im Gebäude dadurch auch verschlechtert werden, so dass hier das Optimum zwischen Energieeinsparung und Anforderungen an eine gute Luftqualität gesucht werden muss. Die komfortorientierte Betriebsweise führt durch die Kombination von Erhöhung und Absenkung des Volumenstroms bei den untersuchten Nutzungsprofilen zu einem leichten Minderverbrauch bei gleichzeitiger Verbesserung bei hohen VOC-Werten.

Mit den vorhandenen Messdaten ist es nicht möglich bereits im Vorfeld der Messphase die optimalen Schwellen/Sollwerte zu bestimmen. Hier sind weitere Messwerte erforderlich, die während der Feldphase gewonnen werden können. Aus diesem Grund werden für den Beginn der Feldphase Schwellwerte im Bereich des 40 %-Quantils für die untere und 80 %- Quantils für die obere Schwelle bei der komfortorientierten Betriebsweise und 40 %- Quantils bzw. 30 %- Quantils bei der energieorientierten Betriebsweise vorgeschlagen. Wenn weitere Daten vorliegen, werden diese zu einer Präzisierung der Berechnungsansätze herangezogen.



**Abbildung 3.3-11: Blockschaltbild der Luftqualitätsregelung für die Feldphase**

Die Regelung (siehe Abbildung 3.3-11) wird in der Feldphase als Schwellwertregelung ausgeführt, da für die Quellstärkenregelung noch zu wenig Erfahrungen bezüglich der Verteilung der VOC-Messwerte im Gebäude und somit für die Interpretation der Quellstärken in der Abluft vorliegen. Es werden jedoch die theoretischen VOC-Werte bei unregelmäßigem Betrieb berechnet, um kontinuierlich ohne Testsequenzen eine statistische Auswertung zu ermöglichen. Als weiteres Modul wird die Feuchteregeung umgesetzt. Über eine Schnittstelle erhält die Regelung Informationen über das Verhalten der Standardregelung, die dem beschriebenen Aufbau vorgeschaltet ist, außerdem werden die Messwerte der LuQaS-Sensoren und der Lüftungsanlage eingespeist.

Die Ansteuerung der Lüftermotoren wird zusätzlich durch das Modul der DrD-Sequenz (siehe entsprechender Teil des Berichts) geführt, die kurzfristige Änderungen der Volumenströme veranlasst, um auf den Öffnungszustand der Fenster rückzuschließen. Anschließend werden über einen D/A-Wandler die Lüftermotoren angesteuert.

## 4 Literatur

- Alko (2007): Firmenprospekt „Air Qualitizer – create your climate“
- Amoore, John. E. (1970): Molecular basis of odor. Springfield, Illinois (1970): Thomas
- Amoore JE (1964) “Current status of the steric theory of odour” Ann. N.Y Acad. Sci. 116, 457-476
- Amoore JE (1964) “The stereochemical theory of odour” Sci. Am. 210, 457-476
- ASHRAE (1997-2001-2005): Handbook of Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- ASHRAE Standard 62-1989: Ventilation for acceptable Indoor Air Quality. Atlanta: American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- ASHRAE Standard 62-2004: Ventilation for acceptable Indoor Air Quality. Atlanta: American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- BINE (2001): Informationsdienst: Projektinformation 1/01. Fachinformationszentrum Karlsruhe.
- Bluysen, P. M (1990): Air quality evaluated by a trained panel. PhD thesis, University of Denmark.
- Bremer Umweltinstitut (2004): Luftqualitätsuntersuchungen und Luftwechsellmessungen ausgewählter Wohnungen und Schulen; Teilbericht 4 das Verbundprojekts LUQAS II, Bremer Umweltinstitut, Bremen 2004
- Breuer, Klaus, Erhard Mayer (2001): Messung und Bewertung von Bauproduktemissionen – Materialgerüche bewerten und aufklären. In: Arbeitsgruppe Luftreinhaltung der Universität Stuttgart, Jahresbericht 2000/2001
- Bundesministerium für Umwelt (2005): Bericht Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen – ausgewählte Handlungsschwerpunkte aus Sicht des BMU, Berlin 2005
- Cain, W.S. & Cornetto-Muniz (1996): “Sensory Irritation Potency of VOC’s measured through nasa localization threshold. Proceedings of Indoor Air, Vol 1, S. 167-172
- CEN (1998): CEN CR – Bericht 1752: Ventilation for buildings: Design criteria for the indoor environment, Brüssel: CEN
- DIN 1946-2: Raumluftechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen. Ausgabe Januar 1994 (zurückgezogen; ersetzt durch DIN EN 13779)
- DIN 1946-6 (1998/2009): Raumluftechnik, Lüftung von Wohnungen. Allgemeine Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung, Ausgaben 1998 sowie 2009

- DIN V ENV 13419-1 (1999): Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC). Teil 1: Emissionsprüfkammer-Verfahren. Berlin: Beuth Verlag
- DIN EN 13725: Luftbeschaffenheit, Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie. Ausgabe 7/2003
- DIN EN 13779 „Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage“, 2007-09
- Ebel, W., Großklos, M., Knissel, J., Loga, T., Müller, K. 2003): Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern. Darmstadt: IWU.
- ETR: Elektronik Technologie Rump Patentschriften: EP 0775912 / EP 896667 / WO 97/41423 / WO 200054840.
- ETR GmbH (2002): Technische Information SSM Smart Sensor Modul. Dortmund: ETR
- European Commission: ECA Report Nr. 11 „Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings“, European Collaborative Action, Brussels, 1992
- European Commission: ECA Report Nr. 18 „Evaluation of VOC Emissions from Building Products“, European Collaborative Action, Brussels, 1997
- European Commission: ECA Report Nr. 19, “Total Volatile Organic Compound (TVOC) and Indoor air Quality Investigations.” European Collaborative Action, Brussels, 1997
- European Commission: ECA Report Nr. 23 „Ventilation, Good Indoor air Quality and Rational use of Energy“, European Collaborative Action, Brussels, 2003
- Fang, L. (1997): Impact of temperature and humidity on perceived indoor air quality. Copenhagen: Technical University of Denmark.
- Fanger, P.O (1988): Introduction of the olf and decipol units to quantify air Pollution perceived by humans indoors and outdoors. Energy and Buildings 12:1-6.
- Fanger, P.O (1988): Olf und decipol – die neuen Maßeinheiten für empfundene Luftverschmutzung. gi – Gesundheits-Ingenieur 109: 216-219.
- Fanger, P.O (1988): A Comfort Equation for Indoor Air Quality and Ventilation. Healthy Buildings, Vol. I
- Fanger, P.O, Lauridsen J., Bluysen, P., Clausen G. (1988): Air Pollution Sources in Offices and Assembly Halls, Quantified by the Olf Unit. Energy and Buildings 12, 7-9
- Fanger, P.O, Hidden olfs in Sick Buildings. Klimatbeheersing, Bd. 18 (1989) Nr. 7, S. 272-274
- Fanger, P.O.: Thermal Comfort; Danish Technical Press - Copenhagen 1970
- Fechner, G.T. (1860): Elemente der Psychophysik, Bd. 2. Leipzig: Breitkopf und Härtel
- Feist, W. et al. (1992): Bauvorbereitendes Forschungsprojekt Passive Häuser. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt

- Feist, W. et al. (1994): Wirtschaftlichkeit von Niedrigenergiehäusern. Sonnenenergie und Wärmetechnik, Heft 4.
- Feist, W. et al. (1997-1): Lüftung im Passivhaus. Protokollband Nr. 4 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser. Darmstadt: Passivhaus Institut
- Feist, W., Grün, L. et al. (1997-2): Materialwahl, Ökologie und Raumlufthygiene. Protokollband Nr. 8 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser. Darmstadt: Passivhaus Institut
- Feist, W. et al. (2003): Lüftungsstrategien für den Sommer. Protokollband Nr. 22 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser. Darmstadt: Passivhaus Institut
- Fitzner, K (1998):. Sensorische Bestimmung der Raumlufqualität in Innenräumen und der Emission von Verunreinigungslasten. DKV Jahrestagung
- Fitzner, K. (2001):. Empfundene Luftqualität in Innenräumen. Verfahren zu ihrer Ermittlung. IHKS Heizung Klima, Sanitär Gebäudeautomation, S. 16-26
- Goldstein, E. Bruce (2002) Sensation and Perception (6th ed.), Wadsworth (152.1 GOL), 7th ed. (2007)
- Goldstein, E. Bruce (2002): Wahrnehmungsphysiologie. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Goschnik, J. (1998): Kamina, Karlsruher Mikronase. Forschungszentrum Karlsruhe
- Grundmann, R., Roloff, J., Meinold, U., Rösler, M., (2003): Hybride Lüftungssysteme. Dresden. (deutscher Beitrag und Übersetzung des IEA ECBCS Annex 35 Projekts „Principles of Hybrid Ventilation“)
- Heinz, E. (2007): Wohnungslüftung. Notwendigkeit, Außenluftbedarf und Realisierung. Berlin: IEMB
- Heinz, E. (2009): Planung lüftungstechnischer Maßnahmen nach neuer DIN 1946-6, in tga-praxis, 5/2009
- Horn et al: Horn, W., O. Jann, J. Kasche, F. Bitter, D. Müller, B. Müller: Umwelt - und Gesundheitsanforderungen an Bauprodukte. Umweltbundesamt, Dessau 2007
- IWU: Lüftung im Wohngebäude Energiesparinformation Nr. 8. Hessisches Wirtschaftsministerium. Wiesbaden
- Krause, C., Chutsch, M. , Henke, M. (1991): Umwelt-Survey, Wohn-Innenraum: Raumluf. Hrsg.: Institut für Wasser, Boden- Lufthygiene des Bundesgesundheitsamtes, Band IIIc. WO-BALU-Heft 4. Berlin.
- Kuhlmann, H. (2006): Aktueller Stand der Sensorik und neue Klassen von MSR-Strategien zur Regelung der Raumlufqualität. In: Kälte Wärme Klima Taschenbuch 2006, Karlsruhe: E.F. Müller.

LuQaS (2001): Abschlussbericht des Forschungsprojekts LuQaS „Reduzierung des Energieeinsatzes raumluftechnischer Anlagen durch den Einsatz von Luftqualitätssensoren“; BMWI Förderkennzeichen 0329795.

Mayer, F., Breuer, K: Geruchsstoffe von Bauprodukten in Innenräumen. Gaschromatographisch-olfaktorische Untersuchung des Materialgeruchs eines Parkettbodens. Bauphysik 22, S. 96-100

Müller, D., Bitter, F., Böttcher, O., Kasche, J., Müller, B. (2004): Neue Systematik zur Bewertung der empfundenen Luftqualität. HLH 55, Nr. 12 , 52-57

Panaskova, J. & Müller, D. (2006): Entwicklung eines Basisgeruchsmodells für die Bewertung der empfundenen Luftqualität. Deutsche Kälte-Klima-Tagung Dresden.

Pettenkofer, M.v. (1858): Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. München: Cottasche Buchhandlung.

o.V.: [http://www.iemb.de/veroeffentlichungen/infobl%E4tter/inf97\\_05.htm](http://www.iemb.de/veroeffentlichungen/infobl%E4tter/inf97_05.htm)

Rietschel, Esdorn (1994): Raumklimatechnik. Springer Verlag

Rump, H. et al. (2005) : Reduzierung des Energiebedarfs Raumluftechnischer Anlagen durch den Einsatz der Triplesensoren zur Erfassung von luftqualitätsbestimmenden Parametern. Teilkonzept 2: LuQaS II (Triplesensor) - 1.4.2002 - 31.3. 2005, Förderkennzeichen BMWI: 0329795. Bietigheim-Bissingen: Fachinstitut Gebäude Klima e.V.

Schmidt, R.F. & Schaible, H.G. (2001): Neuro- und Sinnesphysiologie. Springer Verlag

Sekuler, R & Blake, R. (2002) Perception. (4th ed.) New York: McGraw-Hill (153.7 SEK), chapters 12 & 13 for touch and smell & taste

Steimle, F. et al. (2001): Abschlussbericht des Forschungsprojekts LuQaS : Reduzierung des Energieeinsatzes raumluftechnischer Anlagen durch den Einsatz von Luftqualitätssensoren. Essen: IATK

F. Steimle, R. Wetzel (2003): Ein neu entwickeltes Mischgas-Sensorsystem für bedarfsgeregelte Lüftungssysteme. Velte-Kongress

Steimle, F., R. Wetzel, N. Kleff (2004): LuQaS II (Triplesensor). In: Statusbericht energieoptimiertes Bauen. Forschungszentrum Jülich 2004

Stevens, S.S. (1957): On the Psychophysical Law. Psychological Review, Vol 64, S. 153-181 (1957):

Supply (Fa. ETR, 2007) : Persönliche Kommunikation

Technologie-Transfer-Zentrum Bremerhaven (2003): GOSUB energetische Gesamtoptimierung der Staats- und Universitätsbibliothek Bremen. 2. Zwischenbericht

UTEC, Bremer Energieinstitut, Bremer Umweltinstitut (2004): Schlussbericht Wissenschaftliche Begleitung sowie Verifizierung einer Lüftungsampel für den Einsatz im Mietwohnungsbau und in Schulen. Bremen

- UTEK, Bremer Umweltinstitut (2004): Die Lüftungsampel, Teilbericht 2: Verifizierung der Nullserie. Bremen
- Vanecek, E. (2004): Wahrnehmungspsychologie.  
<http://www.unet.univie.ac.at/~a0401246/Uni/AllgIIIIVO08.pdf>
- VDI 3881 Blatt 1-4 (1986-1992, überprüft und bestätigt 2008); Olfaktometrie, Geruchsschwellenbestimmung. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 6022 (1997): Hygienebewusste Planung, Ausführung, Betrieb und Instandhaltung raumlufttechnischer Anlagen (erneuert 2006).
- Weber, E. H. (1850): Der Tastsinn und das Gemeingefühl. Wagner Handwörterbuch Physiologie, 2. dep. , Vol 3, S. 481-588
- Wetzel, R. (2002): Mischgassensoren in bedarfsgeregelten Lüftungssystemen - Energieeinsparung auf erweitertem Anwendungsfeld möglich. Essen: Institut für Angewandte Thermodynamik und Klimatechnik
- Wetzel, R. (2002): Neues Mischgas-Sensorsystem für bedarfsgeregelte Lüftungssysteme. KI Luft- und Kältetechnik Jg. 38, Nr.10, S.493-498
- Wetzel, R. & F. Steimle (2002): Luftqualitätssensoren - Potentiale eines neu entwickelten Mischgas-Sensorsystems. Essen: Institut für Angewandte Thermodynamik und Klimatechnik der Universität
- Witthauer, Horn , Bischof (1994): Raumlufqualität. Belastung, Bewertung, Beeinflussung  
Karlsruhe: Verlag C.F. Müller
- Yaglou, C.P., Riley, E.C., Coggins, D.I. (1936): Ventilation Requirements. ASHVE Transactions Vol. 42 : 133-162
- Yaglou, C.P., Witheridge, W.N. (1937): Ventilation Requirements (Part 2). ASHVE Transactions Vol. 43 : 423-436